



半導体酸化拡散・化学気相成長装置の高精度熱処理・成膜反応プロセスに関する研究

渡邊, 智司

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2016-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6437号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006437>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

半導体酸化拡散・化学気相成長装置の
高精度熱処理・成膜反応プロセスに関する研究

平成 27 年 1 月

神戸大学大学院 工学研究科

渡 辺 智 司

目次

記号表	1
第1章 緒論	3
1.1 研究の背景・動機	3
1.2 従来研究	6
1.3 研究の目的	8
1.4 全体構成	8
第2章 熱処理プロセスにおけるウエハ放射温度計測技術	10
2.1 背景	10
2.2 放射温度計測システム	11
2.2.1 測定装置の構成	11
2.2.2 放射温度計	12
2.3 実測定時の出力の評価	14
2.3.1 ウエハ放射率	15
2.3.2 光ガイドの透過率	17
2.3.3 迷光の測定値への影響	18
2.4 実験方法	20
2.5 実験結果	20
2.6 石英ロッドを導光体として利用した放射温度計測	23
2.7 放射率の自動補正方法	25
2.8 迷光の低減方法	26
2.9 本章のまとめ	26
第3章 縦型拡散装置のウエハ温度分布解析	27
3.1 背景	27
3.2 伝熱計算プログラム	29
3.2.1 装置温度計算	29
3.2.2 ウエハ面内温度計算	30
3.3 計算結果	32
3.3.1 定常時のヒータ内空間温度分布	32
3.3.2 挿入時のウエハ温度上昇特性	33
3.3.3 挿入時のウエハ面内温度差	35
3.3.4 取出時のウエハ面内温度差	37
3.4 本章のまとめ	39

第 4 章 縦型低圧 CVD 装置の成膜反応プロセス解析	40
4.1 背景	40
4.2 縦型低圧 CVD 装置のネットワーク反応解析モデル	40
4.2.1 縦型低圧 CVD 装置の構造	40
4.2.2 反応解析モデル	41
4.2.3 領域 I における支配方程式	42
4.2.4 領域 II における支配方程式	44
4.2.5 解析フロー	45
4.3 解析モデルの検証	46
4.3.1 解析方法	46
4.3.2 解析結果	49
4.4 ネットワーク解析結果と二次元有限要素法解析結果の比較検討	57
4.5 本章のまとめ	57
 第 5 章 二枚葉低圧 CVD 装置による均一成膜反応技術	58
5.1 背景	58
5.2 二枚葉低圧 CVD 装置の構造	58
5.3 実験結果	62
5.3.1 温度均一性	62
5.3.2 成膜速度均一性	65
5.4 本章のまとめ	70
 第 6 章 結論	71
 参考文献	73
 論文目録	76
 謝辞	78

記号表

C_1, C_2, C_3	: PID 定数
C_p	: 比熱 (J/kg K)
D	: ガスの拡散係数 (m^2/s)
E_t	: 実測定時の放射温度計の出力 (V)
F	: ガスの消滅速度 (m/s)
F_{ik}	: 面要素 i から面要素 k への形態係数
G_i	: 面要素 i の射度 (W/m^2)
H	: 迷光に対する放射温度計の出力 (V)
h	: ウエハ厚さ (m)
$k_{a\beta}$	: ガス a からガス b が気相反応の反応速度定数 (1/s)
N^*	: 熱伝導と放射伝熱の比の無次元数
n	: 屈折率
P	: 圧力 (Pa)
p	: ウエハ間隔 (m)
p^*	: ウエハ間隔の無次元数
Q	: 熱量 (W)
q_i	: 面要素 i に流入する熱流束 (W/m^2)
R	: ウエハ半径 (m)
r	: 半径方向の座標 (m)
S	: ガスが付着する壁面の表面積 (m^2)
S_B	: 面要素の面積 (m^2)
T	: 温度 ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_h	: 炉内壁の温度 ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_m	: 熱電対による測定温度値 ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_r	: 放射温度計の測定温度値 ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_{vc}	: 装置内部温度 ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_w	: ウエハ温度 ($^{\circ}\text{C}$, K)
t	: 時間 (s)
U^*	: 取出速度の無次元数
u	: ガスの流速 (m/s)
V	: ガスが存在する気相体積 (m^3)
V_r	: 黒体に対する放射温度計の出力 (V)
$\bar{v}$	: 平均分子速度 (m/s)
z	: 鉛直方向の座標 (m)

α_s : 迷光の割合を示す係数
 ΔT : 温度差 : 異なる方法で測定した温度計測値間の差,
 または, ウエハ面内温度差(周縁と中心との差) ($^{\circ}\text{C}$, K)
 ΔT_s : 設定温度の変化量 ($^{\circ}\text{C}$, K)
 ε : 放射率
 λ : 熱伝導率 (W/m K)
 λ_r : 放射温度計の測定波長 (m)
 θ : 放射温度計の測定方向とウエハ法線がなす角度 (rad.)
 ρ : 密度 (kg/m^3)
 ρ_w : ウエハ反射率
 ρ_1 : 薄膜と空気の境界での反射率
 ρ_2 : 薄膜とシリコンの境界での反射率
 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$)
 τ : 透過率
 χ : ガスのモル分率
 η : ガスの付着確率
 ψ : 無次元 (基準化した) モル分率

添字

w : ウエハ
 α, β : ガス種の番号
 I, II : 領域の番号

第 1 章 緒論

1.1 研究の背景・動機

図 1-1 に半導体製造工程の概要を示す．単結晶生成 (Crystal growth)，ウエハ加工 (Wafer preparation)，回路設計 (Circuit design)，マスク製造 (Photomasks)，ウエハ処理 (Wafer processing)，イオン打込み (Ion implantation)，酸化拡散 (Oxidation and diffusion)，リソグラフィ (Lithography)，エッチング (Etching)，薄膜形成 (Film deposition and metallization)，組立封止 (Assembly and packaging) などの多数の工程を経て半導体が製造される．半導体集積度はムーアの法則にしたがって毎年 2 倍で増加しており，それに伴って回路パターンの微細化が進展している．また，シリコンウエハ直径は，1980 年ごろは直径 100mm (4 インチ) であったものが，現在は直径 300mm (12 インチ) と増大している．その結果，どの製造工程においても，高精度化，均一化が強く要求されている．

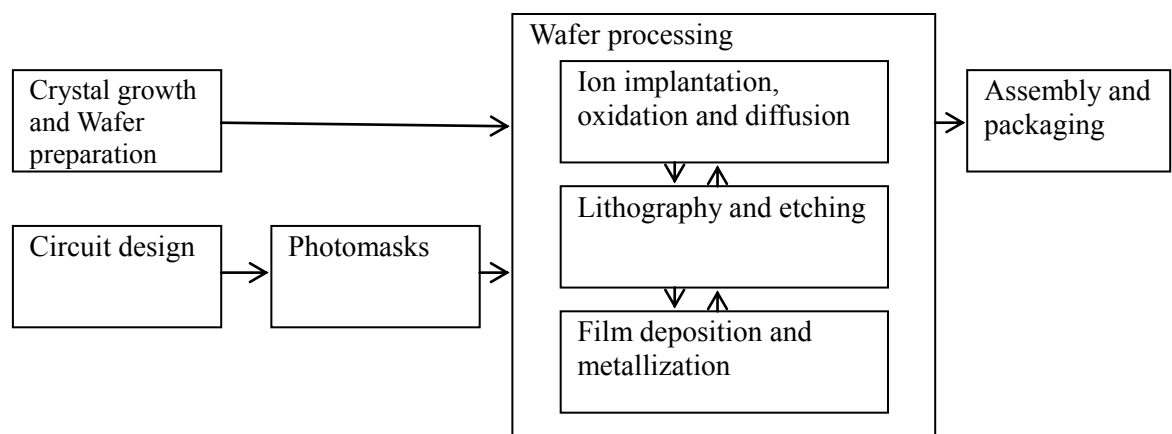


Fig. 1-1 Semiconductor manufacturing process.

代表的なウエハ処理プロセスとして，大気圧でシリコンウエハ（直径 100～300mm，厚さ 0.5～1.0mm のシリコン単結晶の円板基板で，その表面に多数の半導体回路を形成する）を電気ヒータあるいはハロゲンランプヒータにより 800～1200℃に加熱し，シリコン基板への不純物 (B, P, As など) の拡散，結晶損傷の回復，熱酸化膜の形成などを行う酸化拡散プロセスがある．また，低圧力で 600～800℃に加熱したシリコンウエハ表面に酸化シリコン膜，窒化シリコン膜，多結晶シリコン膜などの薄膜を堆積する低圧 CVD (Chemical Vapor Deposition : 化学気相成長) や，プラズマ中で 200～500℃に加熱したシリコンウエハ表面にアルミ膜，窒化シリコン膜などの薄膜を堆積するスパッタ，プラズマ CVD などの薄膜堆積プロセスがある．

これらのプロセスでは，高集積 LSI (Large Scale Integrated Circuit) の不良率低減

や生産自動化のために、加熱中のウエハ温度を精度良く測定し、ウエハ全面が所定の温度で均一になるように加熱量を制御することが重要である。しかし、従来はウエハ温度を測定できる適切な方法がなく、処理中のウエハ温度を直接測定していなかった。そのため、生産現場では、試行錯誤の積み重ねで経験的に加熱条件を決めていた。これは、ウエハに対する汚染の問題から熱電対などの接触温度計の使用が不可能であることに起因していた。非接触でウエハ汚染がない温度計として放射温度計が良く知られているが、酸化拡散やスパッタなどの処理装置内はヒータ熱放射やプラズマ発光などの光学的なノイズが多いため、そういった環境下でも精度良くウエハ温度を測定する手法の開発が必要であった。

酸化拡散プロセスに使用される処理装置は、多数のシリコンウエハを同時に処理するバッチ式と、一枚ごとに処理する枚葉式の二つに大別できる。バッチ装置では多数（数十枚）のシリコンウエハを一定間隔に並べ、電気ヒータにて $800\sim 1200^{\circ}\text{C}$ に数十分間から数時間加熱することにより、シリコン基板中への不純物の拡散、結晶損傷の回復、熱酸化膜の形成などの処理が行われる。古くは、ウエハを横方向から装置（ヒータ）内に出し入れする横型拡散装置が用いられていた。ところが横型拡散装置はウエハ出入時に装置内へ外気が混入し、熱処理のばらつきが大きくなるため、最近は縦型拡散装置が主に用いられている。縦型拡散装置では、装置高さの制約からヒータ全体に対するウエハ熱処理領域（温度が均一な領域）の割合を増す必要があり、さらにウエハ出入によって生ずるウエハ温度分布を短時間で均一化するために、ヒータ発熱量制御の適正化やウエハ配列間隔、挿入・取出速度の適正化の検討が必要となる。これらの検討において、市販の熱流体解析プログラム（Computational Thermo Fluid Dynamics Code, CFD コード）を使うと、メッシュ分割を細かくする必要があるため計算に時間がかかる。そこで、高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発が必要であった。

シリコンウエハ上に低圧で薄膜を堆積させる CVD 装置では、大口径ウエハへの均一成膜が大きな課題である。この課題を解決するには反応室内における流れやガス濃度分布を正確に把握することが不可欠であり、ウエハ上に堆積する薄膜の成長速度を予測する成膜シミュレーションの重要性が高い。しかし、一般に成膜シミュレーションは気体の流れと化学反応を同時に解くため計算に時間がかかる。特に多数（数十枚）のウエハを一度に処理する縦型低圧 CVD 装置では、メッシュ分割を非常に細かくする必要があるため、その傾向がよりいっそう顕著になる。この問題を解決するため、高速に解析できる成膜反応プロセス解析手法の開発が望まれていた。

成膜シミュレーションに基づいた縦型低圧 CVD 装置の均一性改善と同時に、均一性の抜本的な改善策として枚葉低圧 CVD 装置の実用化が望まれていた。DRAM（Dynamic Random Access Memory）の微細化に伴いキャパシタ容量の低下が問題になり、キャパシタ絶縁膜に用いられているシリコン窒化膜の薄膜化が大きく加速したためである。従来、窒化膜は縦型低圧 CVD 装置を用いて成膜されていたが、ウ

エハ間のばらつきが生じやすい縦型低圧 CVD 装置はキャパシタに必要な 10 nm 以下の薄膜の成膜に不向きであった。枚葉低圧 CVD 装置も開発されつつあったが、完全に 1 枚ごとの処理では生産能力が低く、さらに生産能力の高い枚葉装置の開発が必要であった。

図 1-2, 図 1-3 に半導体製造技術のロードマップ⁽¹⁾にある設計ルール (最小回路パターン寸法), 最薄ゲート膜厚, 許容膜厚ばらつきに加え, 本研究で対象とする熱処理装置 (酸化拡散, CVD など) に要求される処理性能の概略値を示す。代表的な処理性能として, 図 1-2 には膜厚ばらつきを, 図 1-3 には熱処理時間を示す。高集積化, 高精度化に伴って, 最小ゲート膜厚, 許容膜厚ばらつきが小さくなり, それに対応するように膜厚ばらつきが小さく, 熱処理時間を短くできる新しい装置の開発が要求されていたことがわかる。熱処理装置として, 横型装置 (Horizontal type, 本論文 2 章), 縦型装置 (Vertical type, 本論文 3, 4 章), 枚葉装置 (Single wafer type, 本論文 5 章) の順に開発され, その後はフラッシュランプ, レーザー技術に発展している。なお, 実際の半導体製造工程では熱処理装置として最新仕様 (最小寸法) の LSI に対しては新しい装置が使われる (使われる比率が高い) が, それ以前の装置も継続的に使用される。

表 1-1 に各装置の開発・高性能化に必要な主要関連技術を示す (説明の補足表でありわかりやすく日本語で書く)。横型装置, 縦型装置, 枚葉装置の順に必要な主要技術が増えており, 各装置で開発した技術はその次の世代の装置にも広く適用される。その技術について, 本論文の 2 章~5 章に説明していく。

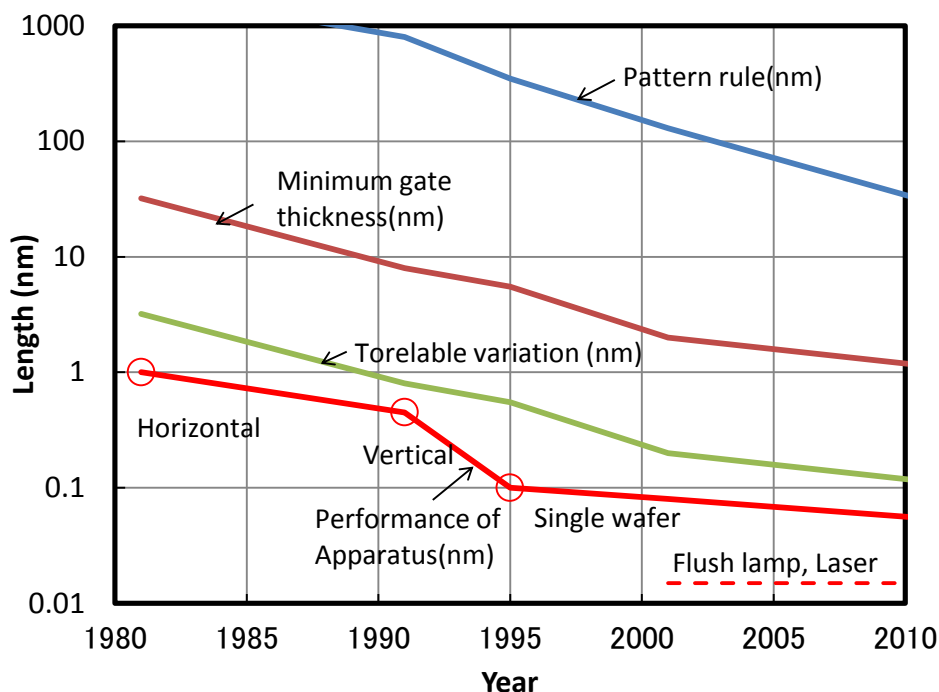


Fig. 1-2 Roadmap of semiconductor manufacturing.

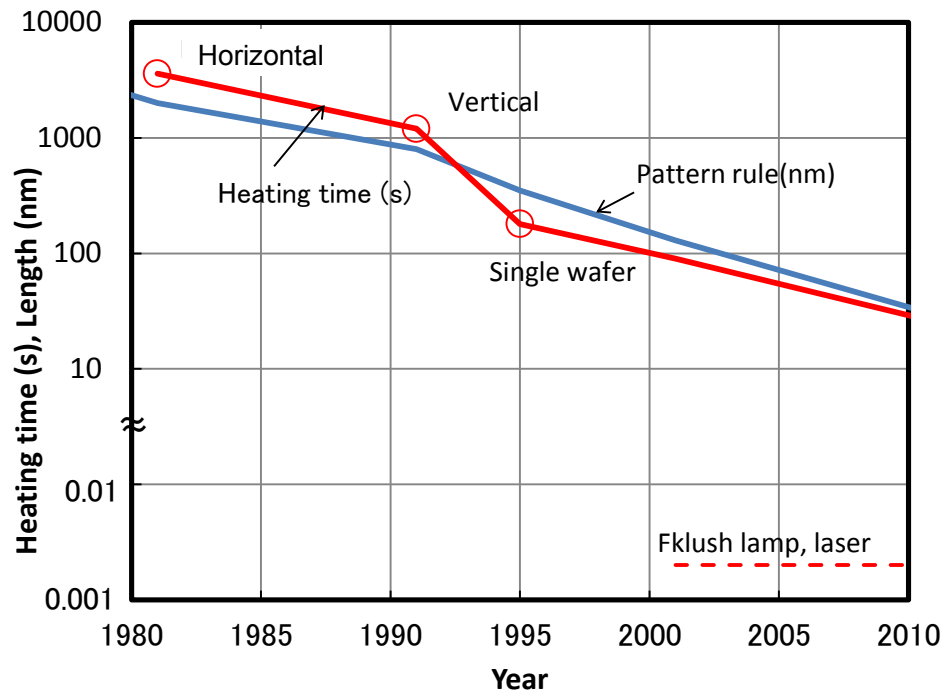


Fig. 1-3 Roadmap of semiconductor manufacturing.

Table 1-1 Relation of technologies for heating apparatus.

	横型	縦型	枚葉
酸化・拡散	・ 非接触温度測定 (本論文 2 章)	・ 均一熱処理の発熱制御 ・ 熱応力検討 (本論文 3 章)	
CVD		・ 化学反応の高速数値シミュレーション (本論文 4 章)	・ 均一成膜の流れ制御 (本論文 5 章)

本研究では以上で述べた、「熱処理プロセスにおいてシリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発」、「縦型拡散装置において高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発」、「縦型低圧 CVD プロセスにおいて高速に解析できる成膜反応解析手法の開発」、「生産能力を増した枚葉低圧 CVD 装置の開発」について、新しい技術を開発し、学術的に基礎技術を体系化し、産業界の発展に貢献した研究成果を報告するものである。

1.2 従来研究

これまでに、バッチ拡散装置の温度分布解析や実験がいくつか報告されている。 $Hu^{(2)}$ は高温のウエハ列を瞬時に室温中に取り出した場合のウエハ面内応力分

布とウェハ直径や間隔との関係を数値計算し、条件によっては熱応力が降伏応力を超えることを示した。

奎屋ら⁽³⁾や小田ら⁽⁴⁾はウェハ列を横型拡散装置に挿入する場合について、ヒータの内壁温度分布を与えたときのウェハおよびボート（多数のウェハを並べる石英治具）の温度変化について三次元放射伝熱計算を行った。

清水ら⁽⁵⁾は横型拡散装置を用い、挿入・取出速度とウェハの熱変形との関係について実験を行い、挿入・取出速度が大きいと挿入時よりも取出時に大きな熱変形が生じることを示した。

Schravendijk ら⁽⁶⁾は横型拡散装置にウェハ列を挿入した場合の、ウェハやヒータの過渡温度変化を数値計算し、変分計算を用いてウェハ温度分布を最小化するヒータ発熱量制御手法を提案した。しかし、ウェハ列をヒータ内に挿入する途中の計算を正しく評価していない。

また、CVD 装置での成膜反応プロセスについても多数報告されている。

Roenigk ら⁽⁷⁾は低圧 CVD（Low-Pressure Chemical Vapor Deposition）プロセスにおける SiH_2Cl_2 原料ガスからシリコン窒化膜（ Si_3N_4 膜）の成膜について中間体 SiCl_2 の堆積現象を考えた成膜メカニズムにより、成膜速度の計算モデルを報告した。

反田ら⁽⁸⁾は TEOS（Tetraethyl Orthosilicate, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ）原料ガスからシリコン酸化膜（ SiO_2 膜）の成膜について中間体 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$, $\text{Si}_2(\text{OC}_2\text{H}_5)_6$ などの堆積現象を考えた成膜メカニズムにより、成膜速度の計算モデルを報告した。

霜垣ら⁽⁹⁾はシラン SiH_4 原料ガスからポリシリコン膜（Poly Silicon 膜、以下 Poly-Si と略す）の成膜について中間体 SiH_2 の堆積現象を考えた成膜メカニズムにより、成膜速度の計算モデルを報告した。

Lin ら⁽¹⁰⁾は CVD プロセスにおける第 1 原理による成膜計算モデルを開発し、バッチ低圧 CVD 装置での Poly Si 膜の成膜プロセスについて実験結果と一致することを報告した。

Sachs ら⁽¹¹⁾はバッチ低圧 CVD 装置での Poly Si 膜の成膜速度の物理モデルと設計因子を考えた 1 次元有限差分計算モデルを提案し、低圧 CVD プロセス最適化について報告した。

Guo ら⁽¹²⁾は均一成膜技術について Multiple Response Surfaces 法を用いた最適制御技術を提案し、バッチ低圧 CVD 装置での Poly Si 膜の成膜、プラズマエッチング、シリコンエピタキシー、タングステン CVD に適用した事例について報告した。

Carlen ら⁽¹³⁾は低圧 CVD プロセスにおいて、成膜の空間分布とパラメータとの関係性を求める統計解析手法を提案し、その統計解析手法を使ったデータ評価は実験結果と 90% 以上に良く一致することを報告した。

Gumpher ら⁽¹⁴⁾はバッチ低圧 CVD 装置での Si_3N_4 膜の成膜について、現象モデルを使った最適化計算手法による実時間でのアダプティブ制御技術を提案し、検

証実験で Si_3N_4 膜の成膜不均一性を約半分に低減できることを報告した。

Morosanu ら⁽¹⁵⁾は SiCl_4 ガスから Si 基板上に Si_3N_4 膜, SiO_2 膜, Poly Si 膜を成膜するプロセスについて, 成膜速度に及ぼす因子の影響についての実験的な検討結果を報告した。

DePinto⁽¹⁶⁾はバッチ低圧 CVD 装置での Poly Si 膜の成膜について, 均一成膜や粒子発生低減を目的として最適設計手法にタグチメソッドを使う 3 ステップ・アプローチ技術を提案し, 検証実験で成膜不均一性を 29%に低減できることを報告した。

Theodoropoulou⁽¹⁷⁾はラピッドサーマル CVD 装置について, ウェハ温度の計算モデルを単純化することにより, 最適化計算を短時間で行うことができる熱解析モデルを報告した。

He ら⁽¹⁸⁾はバッチ低圧 CVD 装置について, 炉内のウェハ温度分布と炉内壁温度分布との関係式を直接解くことで, ウェハ温度分布を短時間の計算で求める熱解析モデルを報告した。

1.3 研究の目的

本研究では, 半導体酸化拡散・化学気相成長装置における高精度熱処理・成膜反応プロセスに関して, 主に次の 4 つの目的を達成するための研究を行う。

第 1 の目的として, 石英プリズムによる全反射を利用して熱放射の光路を曲げ, 直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にあるウェハの温度を測定する手法を使い, ヒータ熱放射やプラズマ発光によるノイズが多い中で, シリコンウェハに非接触で, 精度良くウェハ温度を測定する手法を開発すること。

第 2 の目的として, 適切なモデル化により, 縦型拡散装置のプロセス条件の最適化に使える高速温度解析手法を開発すること。

第 3 の目的として, ネットワーク解析手法の適用により, 縦型低圧 CVD 装置における成膜反応プロセスの条件最適化に使える高速成膜反応解析手法を開発すること。さらにその成膜反応解析手法を用いてシリコン窒化膜, TEOS シリコン酸化膜, リンドープポリシリコン膜の成膜シミュレーションを行うこと。

第 4 の目的として, 2 枚のシリコンウェハを同時に成膜反応させることにより, バッチより薄膜の成膜が可能で, かつ生産能力を倍増する二枚葉低圧 CVD 装置を開発すること。

1.4 全体構成

第 1 章では研究の背景, 研究の目的などを述べ, 第 2 章ではバッチ拡散装置を主な対象としたウェハの放射温度計測技術開発についての実験的な研究成果を述べ, 第 3 章では縦型拡散装置のウェハ温度分布の高速解析手法開発とその解析結果を述べ, 第 4 章では縦型低圧 CVD 装置の成膜反応プロセスの高速解析手法開発とその解析結果および実験結果との比較結果を述べ, 第 5 章では二枚葉低圧

CVD 装置による均一成膜反応技術開発の実験的な研究成果を述べ, 第 6 章では結論をまとめる.

第2章 熱処理プロセスにおける ウエハ放射温度計測技術

2.1 背景

半導体製造工程の酸化拡散プロセスでは、シリコンウエハを電気ヒータあるいはハロゲンランプヒータにより 800～1200℃に加熱し、シリコン基板への不純物の拡散、結晶損傷の回復、熱酸化膜の形成などを行う。また、スパッタプロセス、プラズマ CVD プロセスではプラズマ中でシリコンウエハを 200～500℃に加熱し、シリコン基板表面にアルミ膜、窒化シリコン膜などの薄膜を形成する。これら半導体熱処理プロセスではウエハの大口径化に伴い、処理温度の均一化が望まれている。また、回路パターンの微細化を背景に、薄い酸化膜を形成したり、不純物の拡散深さを浅くする目的で、短時間処理が必要とされる傾向にある。酸化拡散プロセスに由来から最も一般的に使用されているバッチ式の拡散装置では、すべてのウエハを均一温度にするように加熱ヒータの温度を設定して熱処理を行う。ところが、これまでは適切な測定方法がないため、熱処理中のウエハの温度を直接測定していなかった。これは、高温のウエハに対する汚染の問題から、接触式温度計（特に熱電対）を用いた温度測定が不可能であることに起因している。そのため、生産現場では熱処理に先立って石英パイプに入れた熱電対で定常状態の反応管（石英製、この中でウエハを熱処理する）の内部温度を測定し、これを均一にするヒータの温度設定条件を選択し、その条件でウエハの熱処理を行っていた。しかし、処理時間が短くなるにつれてウエハ出入による過渡温度変化の影響が相対的に大きくなり、反応管内部の温度測定結果がウエハの温度と一致しないために、上記の処理方法ではウエハ温度のばらつきを低減することが困難になりつつあった。この問題を解決するため、ウエハを汚染することなく、その温度を直接測定する必要が生じてきた。

本章では、熱処理プロセスにおいてシリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発を目的として、バッチ拡散装置を対象に、石英のプリズムによる全反射を利用して熱放射の光路を曲げ、直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にあるウエハの温度を測定する方法について検討した結果について述べる。

さらに、放射温度計測を実際の生産ラインで実用化するには、ウエハごとに表面状態が異なるため、放射率を補正する機能をもたせることが必要であり、また、ランプ光源あるいはプラズマの強い発光によるノイズを除き、精度良く測定する機能をもたせることが必要である。筆者らが考案したシリコンウエハの放射温度計測における放射率自動補正方法とノイズ低減方法についても述べる。

2.2 放射温度計測システム

2.2.1 測定装置の構成

図2-1に横型拡散装置を対象とした放射温度測定装置の概略を示す。拡散装置は電気ヒータを加熱源とした管状炉でウエハの酸化、拡散、アニールなどに使用される。ウエハはボートと呼ぶ石英治具に載せて、同じく石英製反応管（プロセスチューブ）内に挿入され、複数に分割したヒータで800～1200℃の温度に加熱して処理される。シリコンカーバイド管（以下にSiC管と略す）は温度の均一性を保ち、さらにヒータから発生した不純物がウエハに達するのを防ぐ役目をもっている。

炉内にあるウエハの放射温度測定を行うためには、炉壁の一部を切り欠くか透過窓を設けることにより、測定対象の熱放射を外に取り出さなくてはならない。拡散装置ではウエハの温度均一性の確保、不純物の侵入防止という観点から、熱放射を取り出すためにヒータとSiC管に穴を開けることは困難である。そのため、キャップの一部を切欠き、ここからウエハの熱放射を取り出すことにした。しかし、数十枚のウエハを一度に反応管内で処理するため、この方法では一番手前のウエハ以外は直接その熱放射をとらえられない。そこで石英プリズム（直角を挟む二辺が10mmで幅20mmの直角プリズム。このプリズム2個を組み込んだ治具を、以後、光ガイドと呼ぶ。）による全反射を利用してウエハの熱放射の向きを変え、図2-1に示すようにウエハ周端と反応管の隙間を通して外に取出した。プリズムを含めた光ガイドの材質は、以下の条件を考慮してすべて石英とした。

- (1) ウエハを汚染しない。
- (2) 測定波長（0.9 μ m）に対し透明である。
- (3) 1200℃程度の耐熱性を有する。
- (4) 比較的加工が容易である。

本研究で開発した光ガイドはウエハと同じ要領で石英ボートに載せる構造とし、測定するウエハに隣接してウエハ列の途中に挿入する。そのため、石英ボートの構造やウエハの挿入ピッチを変える必要がないという利点を有している。

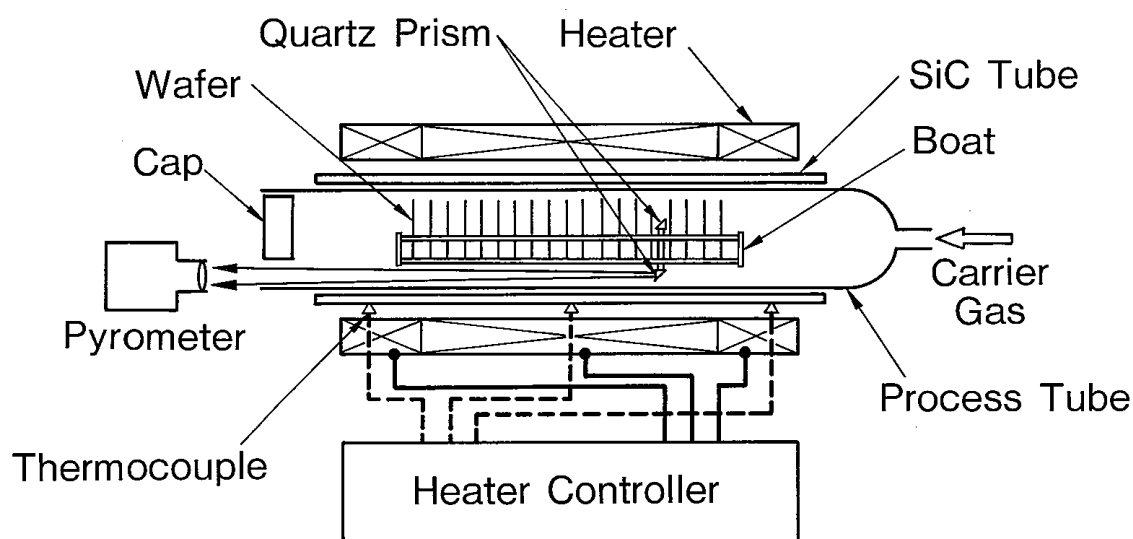


Fig. 2-1 Radiation thermometry of silicon wafer in a diffusion furnace using quartz prisms.

2.2.2 放射温度計

(a) 仕様と構造

開発した放射温度計の仕様を表 2-1 に、構造を図 2-2 に示す．光ファイバ式の単色放射温度計で，検出素子はシリコンフォトダイオード（Silicon Photo Diode, SPD）である．光ファイバはコア，クラッドとも石英で，径はおのおの $50\mu\text{m}$ ， $125\mu\text{m}$ のグレイティッドインデックス形を用いた，測定波長はシリコンウエハが不透明な $1\mu\text{m}$ 以下の波長領域の中で，拡散装置の処理温度 $800\sim 1200^\circ\text{C}$ に対して熱放射強度が強い $0.9\mu\text{m}$ を選択し，干渉フィルタ（中心波長 902.7nm ，半値幅 45nm ）を用いて狭帯域化した．対物レンズは可動焦点方式で有効径は約 30mm ，光ファイバ側から見た受光立体角は 0.0873 ，測定距離は $1\sim 3\text{m}$ である．また，ウエハの熱放射をウエハと反応管の隙間を通して外に取り出さなければならないため，距離係数（測定距離／測定スポット径）を 800 と大きくして狭い隙間を通した測定が容易になるようにした．本放射温度計は以上の構成により， $700\sim 1200^\circ\text{C}$ で 0.1°C 以上の分解能を得ている（ $600\sim 700^\circ\text{C}$ では 1°C の分解能である）．その他，調整時に測定位置と測定光路を確認する目的で，光ファイバを通して対物レンズから He-Ne レーザーを照射し，測定点を照らすことができる機構を設けた．

Table 2-1 Characteristics of the pyrometer.

Type	Narrow-Band Optical-Fiber Radiation Thermometer
Detector	Silicon Photo Diode Maximum Sensitivity : 0.6A/W (at $0.9\mu\text{m} \pm 0.05\mu\text{m}$)
Optical-Fiber	Graded Index Fiber
Measuring Wavelength	$0.9\mu\text{m}$
Objective Lens	Solid Angle : 0.0873 Effective Diameter : 30mm Focal Length : 1~3m L/d : 800
Temperature Range	700~1200°C (Resolution : 0.1°C) 600~700°C (Resolution : 1.0°C)

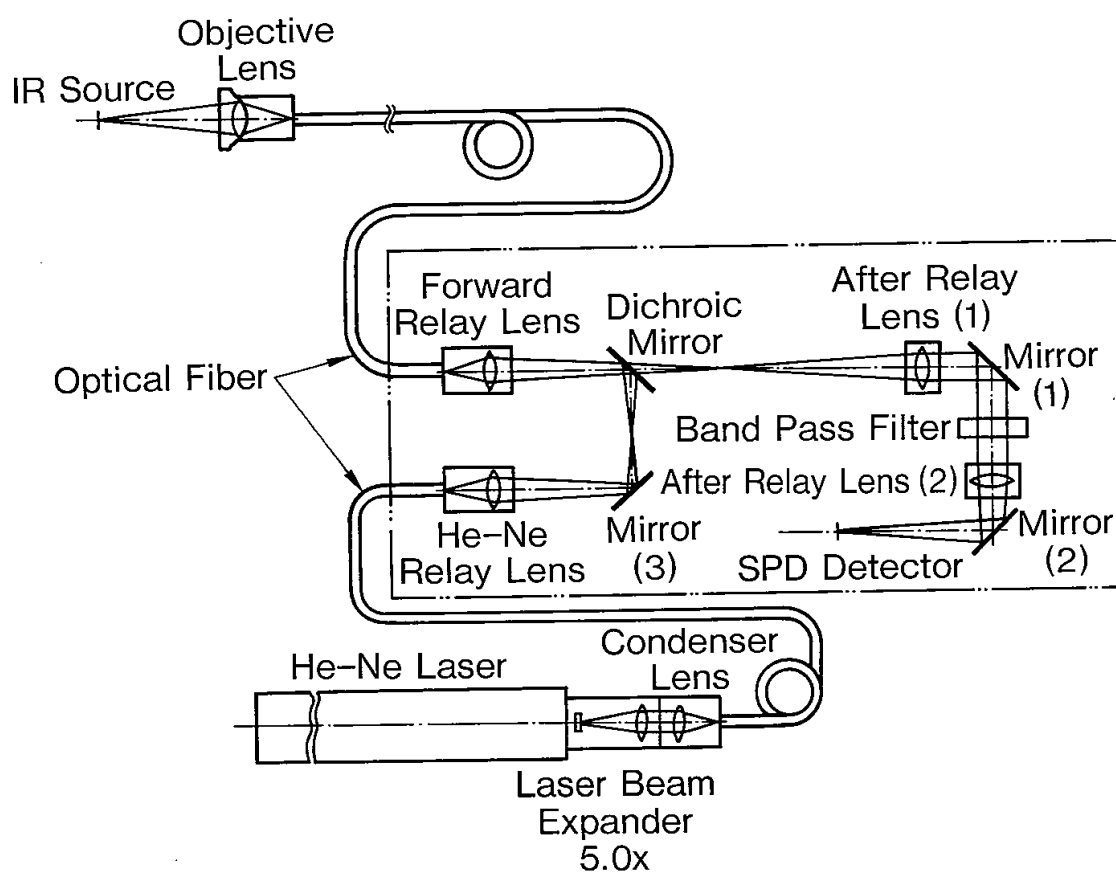


Fig. 2-2 Optical system of the pyrometer.

(b) 出力特性

本放射温度計のように、黒体の分光放射輝度がウィーン近似できる測定波長および温度を対象とする放射温度計では、温度 T の黒体に対する出力 V_r は次式で表わせることが報告されている⁽¹⁹⁾。

$$V_r(T) = C \exp\left(-\frac{c_2}{AT + B}\right) \quad (2.1)$$

ここで、 A , B , C : 放射温度計の定数, c_2 : 放射の第二定数 ($c_2 = 1.4387 \times 10^{-2} \text{mK}$) である。本放射温度計では校正の結果、係数は $A = 9.129 \times 10^{-7} \text{m}$, $B = -6.939 \times 10^{-6} \text{mK}$, $C = 3.038 \times 10^5 \text{V}$ の値となり、出力電圧 V_r は 600°C においては約 3.750mV , 1000°C では約 1.186V であった。

2.3 実測定時の出力の評価

本放射温度計が実測定時にウエハなどから受ける熱放射に対する出力 E_t は次式で表わせる。

$$E_t = \tau_s \varepsilon_w V_r(T_w) + H \quad (2.2)$$

ここで、 T_w はウエハ温度, τ_s は光ガイド透過率, ε_w はウエハ放射率である。また、 H は炉内壁 (SiC管) から放出された熱放射とウエハ (測定点以外) から放出された熱放射が、ウエハやプリズムで反射あるいは散乱した後に放射温度計に達する迷光に対する出力である。これはウエハやプリズム表面で鏡面反射した熱放射と、ウエハやプリズム表面で拡散反射した熱放射ならびにプリズム内部で散乱した熱放射の和に分けられる。前者は、放射温度計の測定光路がウエハやプリズムの表面と常に垂直に交差するように調整すれば、零にすることができる。これに対し、後者はこれら表面の滑らかさやプリズム内部の欠陥に依存し、完全に零にすることはできない。上述のように炉内壁を源とする迷光以外にウエハ (測定点以外) を源とする迷光もあるが、迷光が問題となるのはウエハの出入中や挿入直後でウエハ温度が炉内壁温度より大幅に低い場合に限られるため、実際には炉内壁を源とする迷光を考えれば十分である。炉内壁を黒体と仮定すれば、式(2.2)は次のように変形できる。

$$E_t = \tau_s \varepsilon_w V_r(T_w) + \alpha_s V_r(T_h) \quad (2.3)$$

ここで、 α_s はウエハならびにプリズムで散乱した迷光の割合を示す係数で、 T_h は炉内壁の温度である。 α_s が既知であれば、炉内壁の熱放射に対する出力 $V_r(T_h)$ 、換言すれば温度 T_h を別に測定し、式(2.3)を用いて迷光の影響を補正することで誤差を

低減できる．しかし，実際には炉内壁の温度が位置によって異なり，迷光が炉内壁のどの位置から放射されたのかを特定することが困難であるから，必ずしも T_h を精度良く測定できるとは限らない．これに対し，迷光に対する補正を行わなければ式(2.3)は次式となる．

$$E_t \cong \tau_s \varepsilon_w V_r(T_w) \quad (2.4)$$

2.3.1 ウエハ放射率

実プロセスでは熱処理によってウエハ表面に薄膜を形成するため，干渉効果により放射率が刻々と変化する．これに対処するには次のような方法が考えられる．

- (1) 膜厚（あるいは放射率）を同時に測定しながら温度測定する．
- (2) ウエハの温度測定結果と処理条件から膜厚変化を推定しながら温度測定する．
- (3) 熱処理中に膜厚が変化しないウエハを測定用として使用する（ex. 酸化処理では Si_3N_4 膜付ウエハを用いる）．

本研究の実験では(3)の方法を用いたが，実プロセスでは(2)の方法が実用的である．ウエハ放射率をあらかじめ測定するとともに，後述のように膜の種類や厚さに対する換算式を求めておき⁽²⁰⁾，この値を用いて補正すれば良い．

(a) 温度依存性

測定波長におけるウエハ放射率の温度依存性を実験で求めた結果を図2-3に示す．これは，表面に3nmの SiO_2 膜が付いたウエハの温度を放射温度計と熱電対で同時に測定し（光ガイド未使用．以降，未使用の場合は光ガイド無，使用の場合は光ガイド有と記載．），その測定値から算出した結果である．熱電対による測定値 T_m がウエハの真温度を表わすと仮定すれば，同温度の黒体に対する放射温度計の出力は式(2.1)より $V_r(T_m)$ である．これに対し，光ガイド無で測定した場合の放射温度計の出力は式(2.3)より $E_t = \varepsilon_w V_r(T_m)$ であるので，両者の比から放射率 ε_w が求まる．なお，放射率算出にはウエハを拡散装置の中に入れて温度が定常になった後の測定値を用いた．2.3.3項で述べるようにウエハ表面での拡散反射の割合は少ないから， $\alpha_s = 0$ としてもほとんど影響がない．図2-3からわかるように，ウエハ温度が700℃以下になると放射温度計の出力が小さくなるため測定値のばらつきが大きくなるものの，600～1000℃においてウエハ放射率は温度によって変化していないことがわかる．この結果から，測定時にウエハ放射率の温度依存性を考成する必要はないことが確認できた⁽²¹⁾．

(b) 薄膜の干渉効果

上述のように物体表面に薄膜が形成されると，光の干渉効果によって膜厚変化に対し放射率が周期的に変化することが知られている．放射温度計の測定波長に対し，シリコンウエハが不透明⁽²²⁾で，形成した薄膜が単層で透明と仮定すれば，ウエハ放

射率 ε_w は次式によって表わすことができる⁽²⁵⁾.

$$\varepsilon_w = 1 - \frac{\rho_1 + \rho_2 + 2\sqrt{\rho_1\rho_2} \cos \gamma}{1 + \rho_1\rho_2 + 2\sqrt{\rho_1\rho_2} \cos \gamma} \quad (2.5)$$

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_r} 2nd \cos \theta \quad (2.6)$$

ここで、 ρ_1 ：薄膜と空気の境界での反射率、 ρ_2 ：薄膜とシリコンの境界での反射率、 θ ：測定方向とウエハの法線がなす角度、 λ_r ：波長、 n ：薄膜の屈折率、 d ：薄膜の厚さ、である。 ρ_1 、 ρ_2 はシリコンと薄膜の屈折率を用いてフレネルの公式⁽²⁴⁾より求められる。表2-2にSiO₂膜、Si₃N₄膜、Siの屈折率 n と、 ρ_1 、 ρ_2 を示した⁽²²⁾。図2-4は、表2-2の値を使って式(2.5)、(2.6)からSiO₂膜付ウエハとSi₃N₄膜付ウエハ放射率を求めた計算値と、図2-3の実験と同じ方法で求めた実測値を比較した結果である。計算値と実測値が1～2%の誤差で一致しており、膜厚が既知のウエハでは干渉理論による式(2.5)から放射率を求められることがわかる。

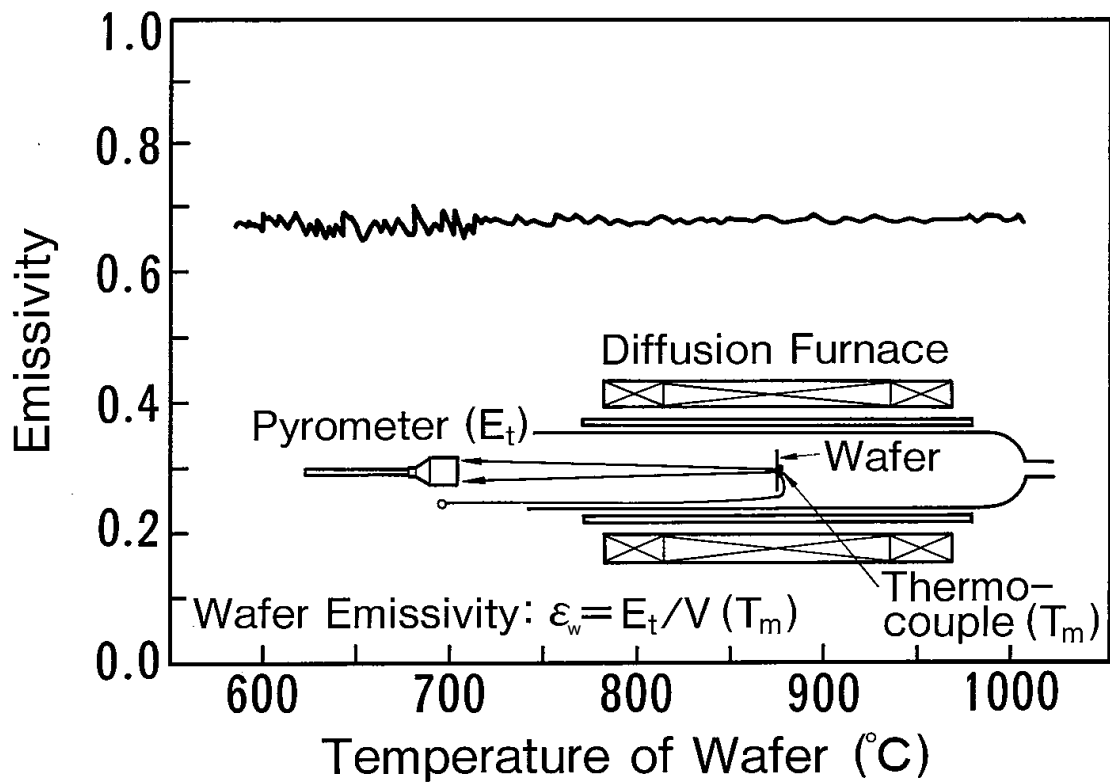


Fig. 2-3 Experimental result for the temperature dependence of the wafer emissivity at the measuring wavelength of 0.9μm.

Table 2-2 The refractive index of Si, SiO₂, Si₃N₄, and reflectivity ρ_1 , ρ_2 .

	n	ρ_1	ρ_2
Si	3.65	—	—
SiO ₂	1.45	0.034	0.186
Si ₃ N ₄	2.00	0.111	0.085

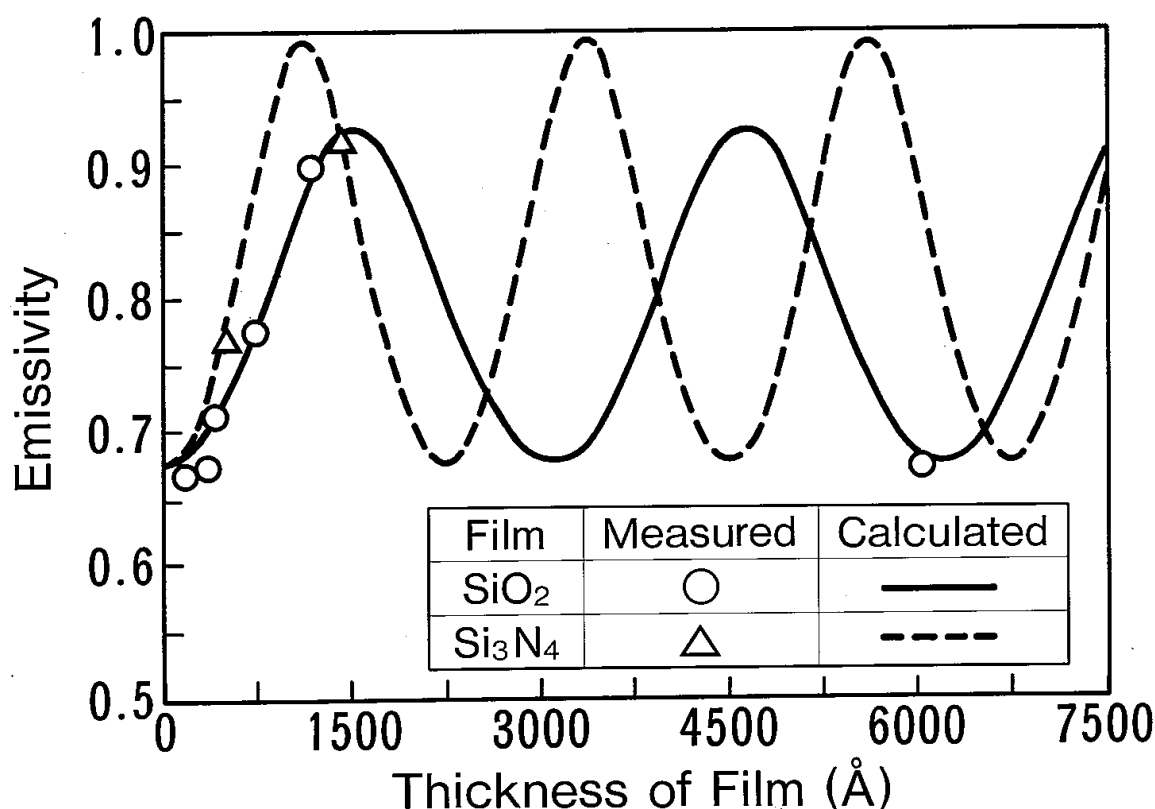


Fig. 2-4 Emissivity of wafers with SiO₂ or Si₃N₄ film at the measuring wavelength of 0.9 μ m.

2.3.2 光ガイドの透過率

石英プリズム内での全反射によって熱放射の減衰が起きないと仮定する．石英が透明であるため，プリズム透過率 τ_p を求めるには，表面でのフレネル反射のみを考慮すればよい．その場合，プリズムは透過率 τ_q ，反射率 $\rho_q = 1 - \tau_q$ の平行な2平面と光学的に等価である．プリズム透過率 τ_p は平面間の多重反射を考慮して次式で表わせる．

$$\tau_p = \frac{\tau_q^2}{1 - \rho_q^2} \quad (2.7)$$

$$\rho_p = 1 - \tau_p \quad (2.8)$$

ここで ρ_p はプリズム反射率である．つぎに，プリズム2個を組み合わせた場合の透過率 τ_g は，上式と同様に次式で表わせる．

$$\tau_g = \frac{\tau_p^2}{1 - \rho_p^2} \quad (2.9)$$

$$\rho_g = 1 - \tau_g \quad (2.10)$$

ここで ρ_g は光ガイド反射率である．最後に，プリズムとウエハ間の多重反射を考慮すれば，次式で光ガイド透過率 τ_s が求まる．

$$\tau_s = \frac{\tau_g}{1 - \rho_g \rho_w} = \frac{\tau_g}{1 - \rho_g (1 - \varepsilon_w)} \quad (2.11)$$

この結果，光ガイド透過率 τ_s はウエハ放射率 ε_w の関数になることがわかる．石英の0.9 μm での屈折率は1.45であり⁽²²⁾， $\tau_g = 0.034$ となるから，式(2.11)は具体的には次式となる．

$$\tau_s = \frac{0.877}{1 - 0.123(1 - \varepsilon_w)} \quad (2.12)$$

2.3.3 迷光の測定値への影響

式(2.3)に示した迷光の割合を示す係数 α_s は理論的に求められないため，実験でその値を求めた． α_s は光ガイドで生ずる迷光成分を示す α_{s1} と，ウエハで生ずる迷光成分を示す α_{s2} の和として次式で与えられるとする．

$$\alpha_s = \alpha_{s1} + \alpha_{s2} \quad (2.13)$$

ここで，温度 T_b の空洞黒体を定常状態で測定すると ($\alpha_{s2}=0$ ， $\varepsilon_w=1$)，光ガイド有の場合の放射温度計の出力は式(2.3)の T_w ， T_h を T_b でおきかえた次式で表わせる．

$$E_t \cong (\tau_s + \alpha_{s1}) V_r(T_b) \quad (2.14)$$

さらに、同様に温度 T_b の空洞黒体を光ガイド無で測定すると ($\alpha_{s1}=0$, $\tau_s=1$) , 放射温度計の出力は,

$$E'_t = V_r(T_b) \quad (2.15)$$

となる．よって、式(2.14), (2.15)から α_{s1} は

$$\alpha_{s1} \cong \frac{E_t}{E'_t} - \tau_s \quad (2.16)$$

で与えられる．実際に、処理温度（空洞黒体温度） $T_b=1000^\circ\text{C}$ とした測定値から α_{s1} を求めた結果、0.0034であった．一方、ウエハで生ずる迷光は、最大でも光ガイドの迷光より小さいと考えられる．これは、ウエハ表面がプリズムと同じく平滑な面であること、プリズム表面を通過する回数に比べウエハ表面で反射する回数が少ないことから妥当な仮定である．

以上の考察結果を基に、迷光が光ガイドのみで生じるとした $\alpha_s=0.0034$ ($\alpha_{s2}=0$) の場合と、光ガイドとウエハで同じ割合で迷光が生じるとした $\alpha_s=0.0068$ ($\alpha_{s2}=0.0034$) の場合の放射温度計による測定誤差を概算する． $T_h=1000^\circ\text{C}$ と $T_h=850^\circ\text{C}$ の場合に、ウエハ温度 T_w が $500\sim 1000^\circ\text{C}$ あるいは $350\sim 850^\circ\text{C}$ まで変化したときの放射温度計の出力を式(2.3)より求め、この出力値から式(2.4)を用いて求めた $\Delta T = T_{r4} - T_w$ と T_w の関係を図2-5に示す．ここで、放射温度計の出力が与えられたときに、式(2.3)あるいは式(2.4)から求めたウエハ温度の測定値を T_{r3} , T_{r4} とした．ウエハ温度 T_w が各 T_h より約 250°C 低いときの ΔT は、 $\alpha_s=0.0034$ では約 10°C , $\alpha_s=0.0068$ では約 20°C となることがわかる．また、 T_w が高くなるにつれて ΔT は指数関数的に減少し、 $T_w=T_h$ のときはすべての場合において 0.5°C 以下になる．

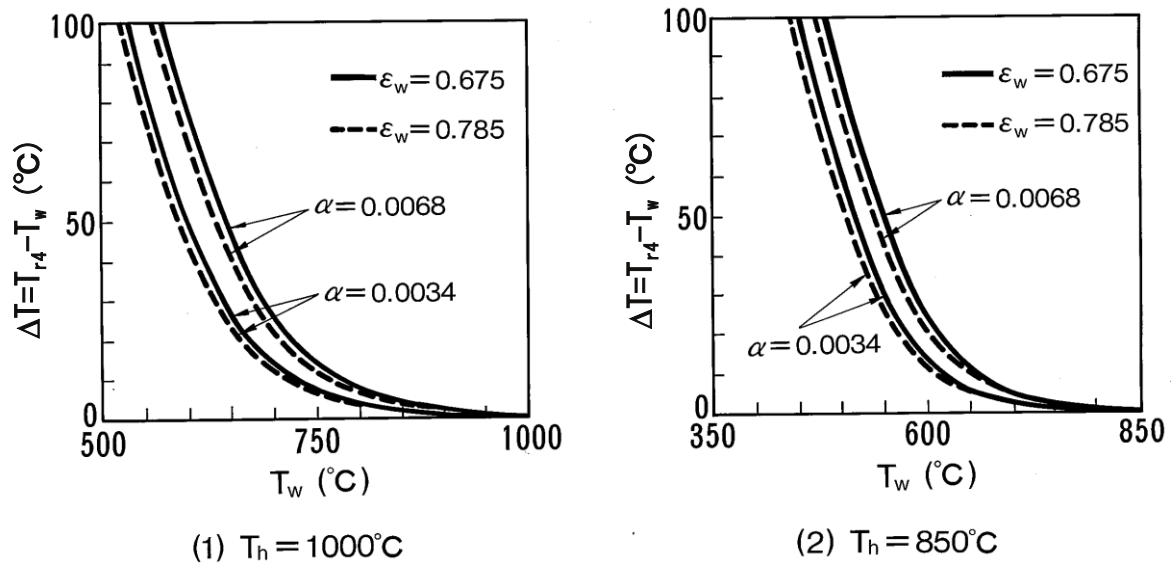


Fig. 2-5 Difference between T_{r4} and T_w due to veiling glare.

2.4 実験方法

本温度測定方法の有効性を検証するために、横型拡散装置内へウエハを出し入れして温度変化を測定した。

ここでは処理中に膜厚の変化しないウエハを温度測定の対象とする方法で実験を行った。実際に測定対象としたのは4インチ径で、厚さ3nmの SiO_2 膜付きウエハと、厚さ51.3nmの Si_3N_4 膜付きウエハである、これらのウエハの放射率は式(2.5)からおのの0.675, 0.735, 光ガイドの透過率は式(2.11)から0.914, 0.901と求められる、 SiO_2 膜付ウエハは100/min. の割合で窒素ガスを流しながら処理した。また、 Si_3N_4 膜付ウエハは大気中、すなわち20%酸素中で処理した。ウエハの挿入・取出速度は20cm/min. で、7分30秒で挿入、炉内で45分間処理、7分30秒で取出、という全体で60分の測定を行った。図2-1の中央ヒータ制御用熱電対に対する設定温度（処理温度）は1000°Cおよび850°Cとした。

2.5 実験結果

図2-6～図2-9に測定結果を示す。式(2.3), 式(2.4)による放射温度計の測定値 T_{r3} と T_{r4} , および熱電対の測定値 T_m との差 $\Delta T_3 = T_{r3} - T_m$ と $\Delta T_4 = T_{r4} - T_m$ を示した。式(2.3)の T_h には上記の熱電対に対する設定温度1000°C, 850°Cを代入し、さらに $\alpha_s = 0.0034$ として温度を算出した。

ウエハの挿入完了から取出開始までの45分間は、処理温度、ウエハ放射率にかかわらず T_{r3} , T_{r4} と T_m が約 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内の差で一致している。挿入完了時点でウエハは設定した処理温度に対し80～90°C低い温度にまで加熱されており、迷光の影響（図2-5より2～3°Cと見積られる。）は無視できる範囲に収まっている。これに対し、ウエハ挿入中に T_{r3} , T_{r4} が両者とも T_m より高い値を示すのは放射温度計の応答性が速いためである。また、 T_{r4} が T_{r3} より高い値を示すのは、迷光の影響が加わるか

らである．一方，ウェハ取出時には放射温度計の応答性が速いために，挿入時とは反対に T_{r3} , T_{r4} とも T_m より先に下がり始める．しかし， T_{r4} は次第に T_m より高い値を示すのに対し， T_{r3} は常に T_m より低い値を示す．これは，取出開始直後はウェハ温度が比較的高く応答性の差が頭著に表われ，しだいに，ウェハ温度が低くなるにつれて迷光の影響のほうが大きくなるからである．また，迷光を補正しない式(2.4)の測定誤差はウェハ温度が炉内壁温度より250℃低い場合で10～20℃，さらに，150℃低い場合で約5℃（図2-5参照）と見積もったが，これは熱電対の応答の遅れによる誤差と同程度である．このように，ウェハを炉内へ挿入するとき，および挿入直後の温度が低いウェハを測定する場合には，測定誤差が大きくなる．しかし，拡散装置における熱処理の効果は温度上昇とともに指数関数的に増加する場合が多く，式(2.4)の測定値から精度良く熱処理の効果を推定できる．

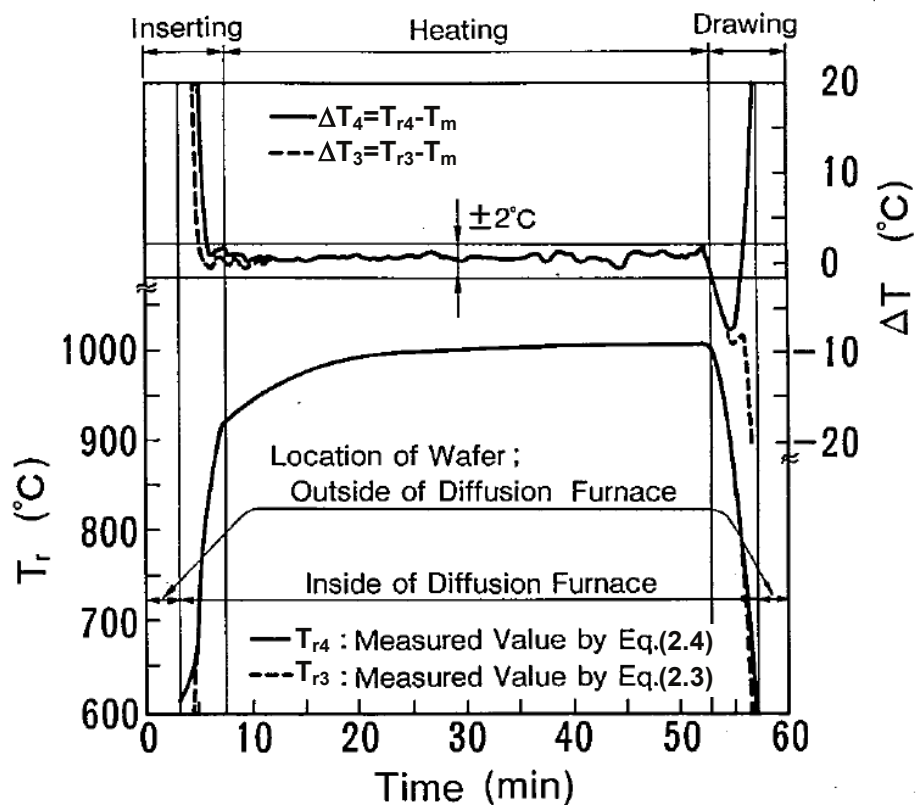


Fig. 2-6 Measured temperature for wafer with SiO_2 film during heating cycle in diffusion furnace at 1000°C.

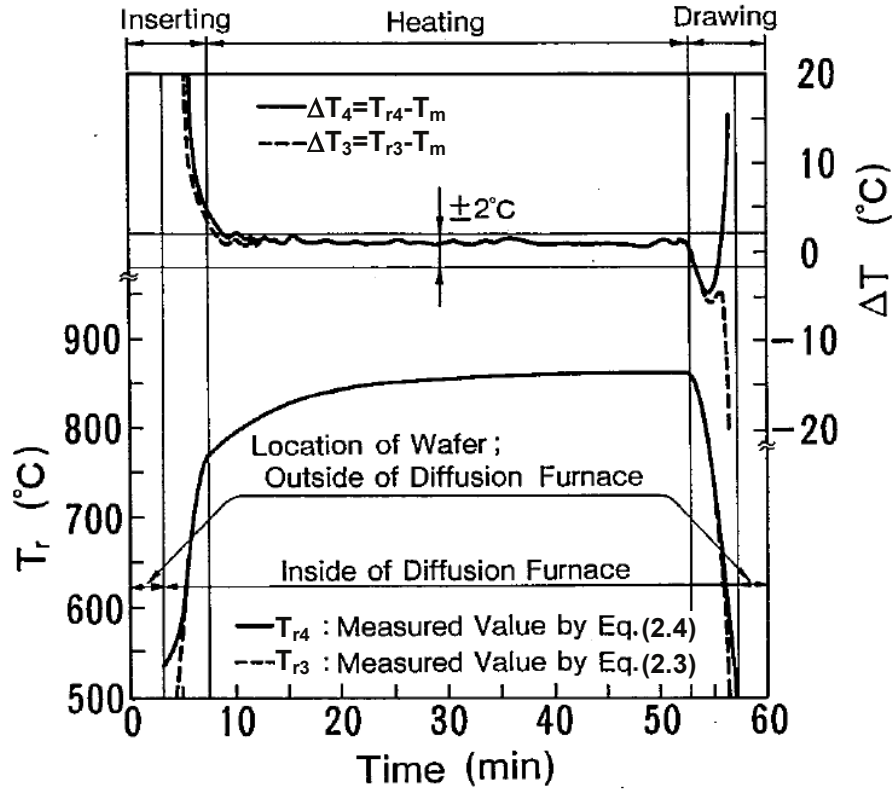


Fig. 2-7 Measured temperature for wafer with SiO_2 film during heating cycle in diffusion furnace at 850°C .

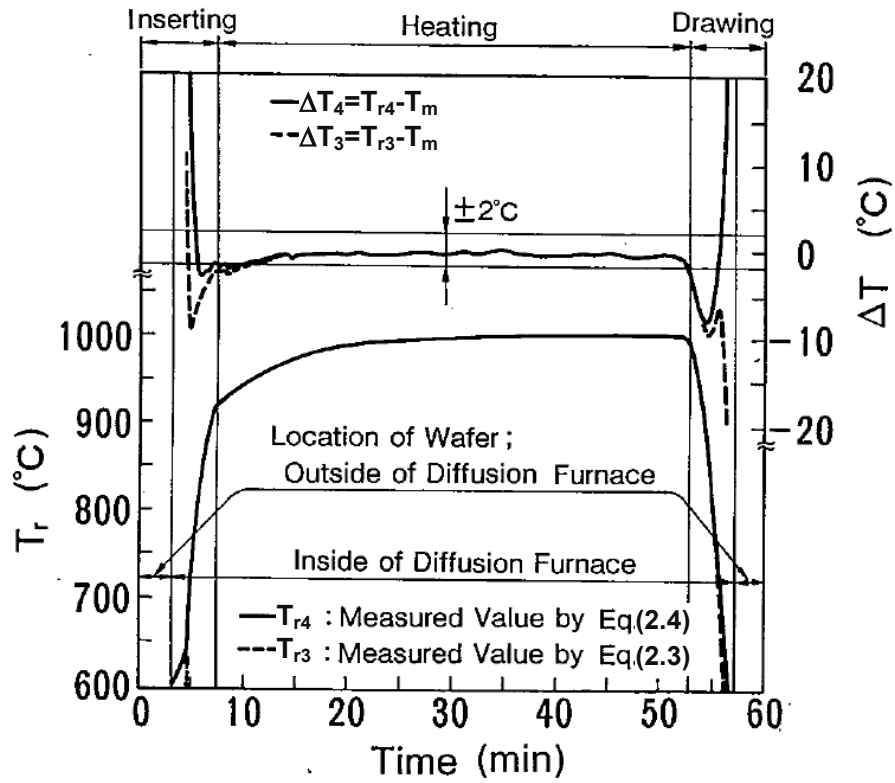


Fig. 2-8 Measured temperature for wafer with Si_3N_4 film during heating cycle in diffusion furnace at 1000°C .

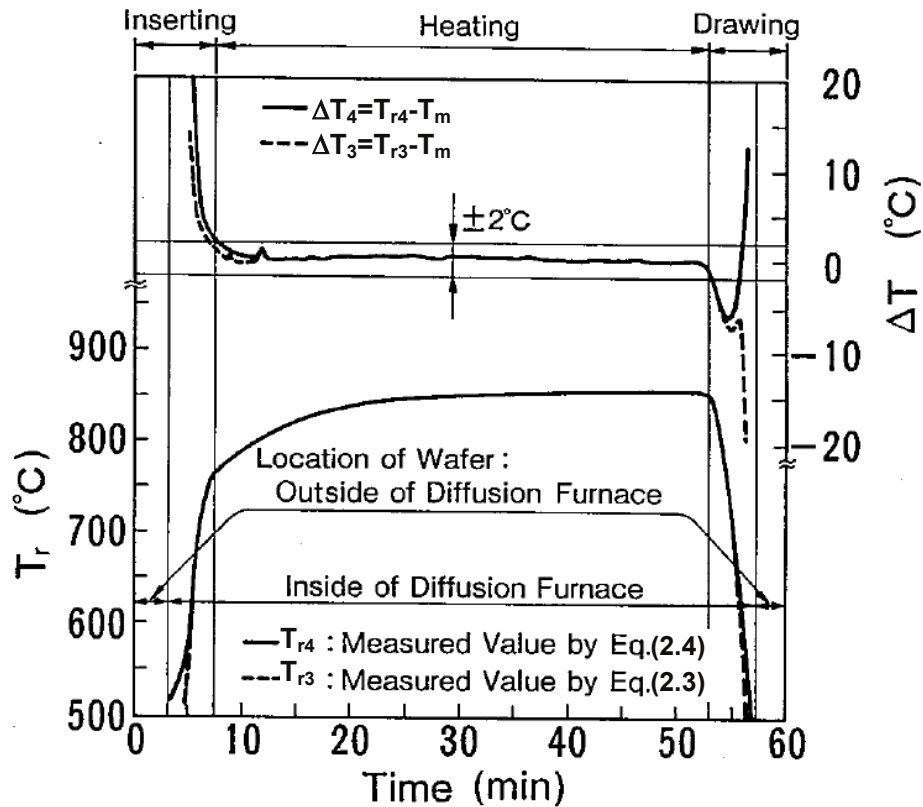


Fig. 2-9 Measured temperature for wafer with Si_3N_4 film during heating cycle in diffusion furnace at 850°C .

2.6 石英ロッドを導光体として利用した放射温度計測

これまでは石英プリズムの反射を利用した放射温度計測について説明したが、石英プリズムの代わりに石英ロッドを導光体として利用した放射温度計測（石英ロッドの一端から入射した光は、光ファイバと同じ原理でロッドの側面を全反射しながら他端に到達する。この原理でウエハの熱放射を炉外に取り出す。）の測定誤差を実験で計測した。実験装置と実験結果を図 2-10、図 2-11 に示す。石英ロッド側面の微細な傷から迷光が入り込むことで測定誤差は $20\sim 40^\circ\text{C}$ に達し、測定精度が悪い。これに対して、石英プリズムを導光体とした場合の実験装置と実験結果を図 2-12、図 2-13 に示す。測定誤差は 0.5°C 程度である。石英プリズム方式は石英ロッド方式に比べて格段に精度が高いことがわかる。

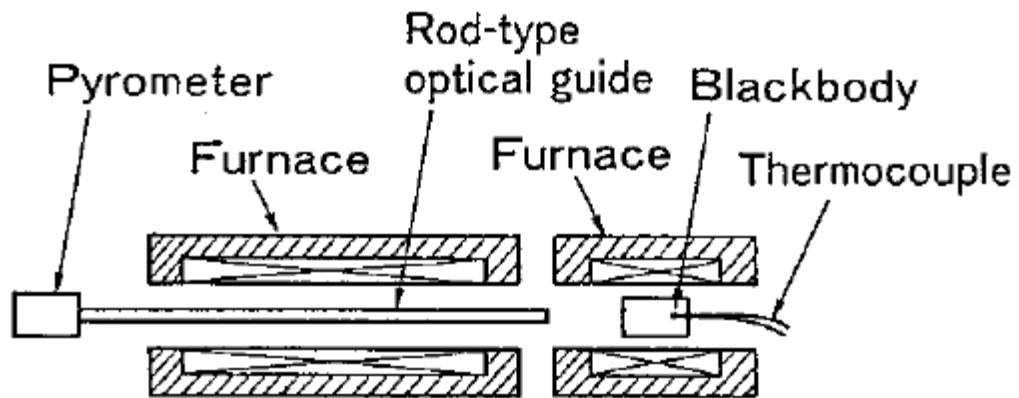


Fig. 2-10 Experimental apparatus for rod-type optical guide.

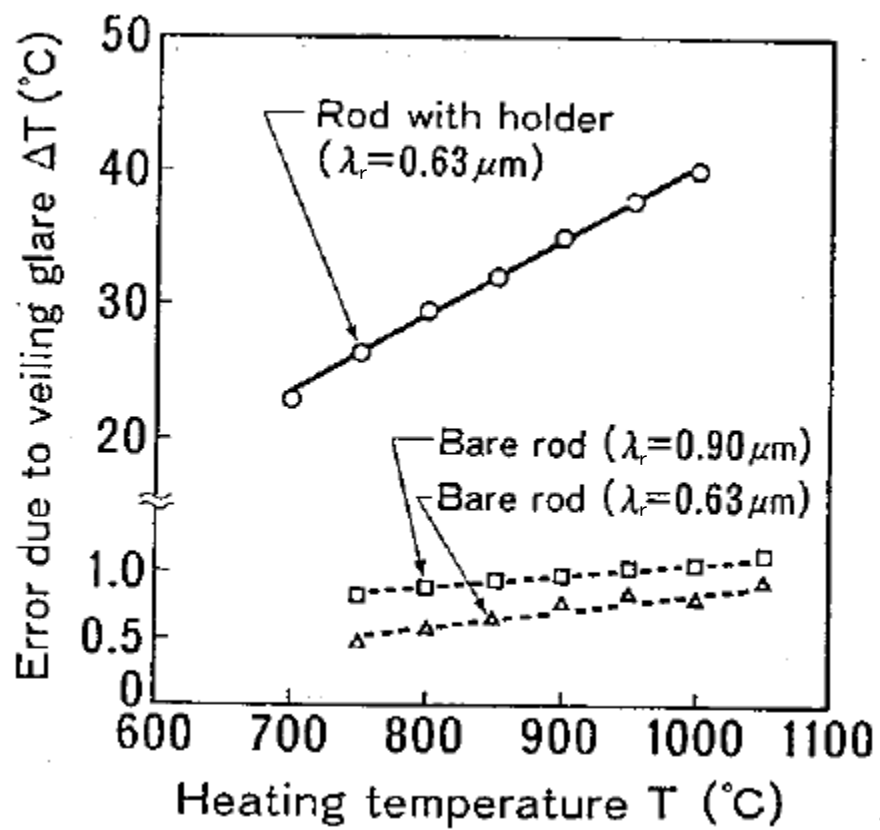


Fig. 2-11 Error of rod-type optical guide.

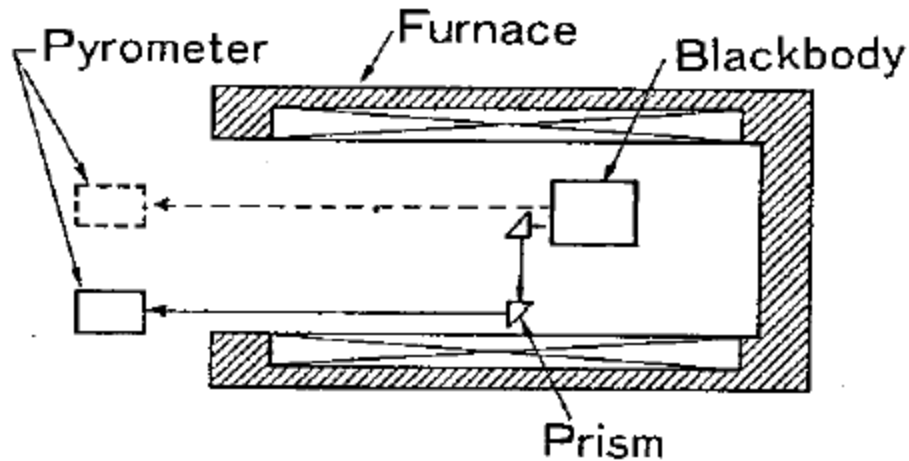


Fig. 2-12 Experimental apparatus for prism-type optical guide.

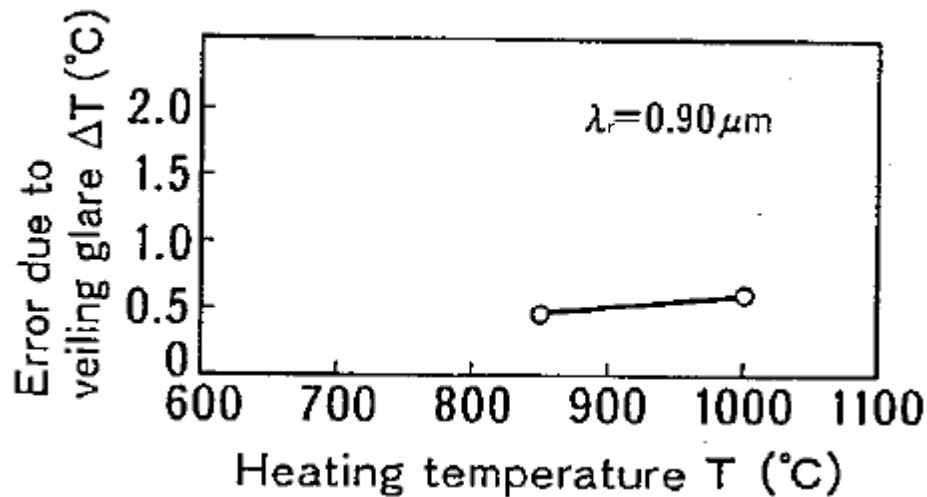


Fig. 2-13 Error of prism-type optical guide.

2.7 放射率の自動補正方法

シリコンの放射物性は、温度 600°C 以上あるいは波長 $0.9\mu\text{m}$ 以下にて不透明で放射率の温度変化がなく、温度 600°C 以下かつ波長 $0.9\mu\text{m}$ 以上にて透過性があり、放射率が温度に依存して変化する、という特徴がある⁽²¹⁾。また、回路パターンが加工される前のシリコンウエハの表面は鏡面であり、その表面に薄膜が形成されていくと、薄膜の厚さや波長によって放射率が周期的に変化する⁽²⁰⁾。放射温度計測における放射率の補正方法として二色式放射温度計が知られているが、シリコンのように放射率が波長によって変化する場合には精度が悪い。シリコンウエハに適した放射率の自動補正方法を次に示す。

- (1) シリコンが不透明で放射率の温度変化がない波長 $0.9\mu\text{m}$ の放射温度計を用い、ウエハが加熱される前に放射率を測定する⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

- (2) 加熱中のウエハに基準光源から赤外線をパルス的に照射し、ウエハからの放射エネルギーの変化量を測定して放射率を求める⁽²⁷⁾.
- (3) 高温装置に挿入したウエハの温度上昇速度がウエハ放射率に依存するため、温度上昇中のウエハからの放射エネルギーの変化を測定し、演算器での放射伝熱計算により放射率を求める⁽²⁸⁾.

第1の方法は拡散装置のようにウエハ温度が800℃以上になりウエハからの波長0.9μmの放射強度が大きい場合に用いられる. 詳細は省くが、拡散装置を用い実験を行った結果⁽²⁹⁾、本方式により放射率を精度5%以内で求めることができ、それはウエハ温度（1000℃レベル）の測定精度2℃に相当することを確認した.

2.8 迷光の低減方法

ランプ加熱やプラズマ処理されるウエハの放射温度計測における迷光の低減方法として、測定波長以外の光をフィルタで除去する方法⁽³⁰⁾や、石英が不透明となる波長5μm以上を測定波長とし、ウエハを収納している石英管を遮へい板として利用する方法⁽³¹⁾が、これまでに提案されている. 前者については測定波長域にもランプあるいはプラズマの発光があるため完全に迷光を除去することができず、後者については石英管に測定窓を開ける必要があり実用上の障害になっている. 筆者らが提案した迷光低減方法を次に示す.

- (1) ウエハが平滑な鏡面反射面であることを利用し、ウエハに対し垂直の放射光のみを放射温度計で測定する⁽³²⁾.
- (2) プラズマは通常ウエハの片側にだけあるので、ウエハが不透明となる波長0.9μmを測定波長とし、プラズマの反対側から測定する⁽²⁷⁾.
- (3) 迷光の原因となるプラズマの発光エネルギーとウエハからの放射エネルギーの両者を同時に測定し、プラズマの影響を補正する⁽²⁷⁾.

詳細は省くが、第1の方法をランプ加熱拡散装置に適用し実験を行った結果⁽³³⁾、本方式によりウエハ温度（1000℃レベル）を精度2℃以内で求めることができることを確認した.

2.9 本章のまとめ

- (1) 熱処理プロセスにおいてシリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発を目的として、拡散装置において2個の石英プリズムからなる光ガイドを用いて熱放射の光路を曲げ、直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にあるシリコンウエハの放射測温を行う方法を開発した.
- (2) 開発した放射測温法では光ガイドとウエハでの迷光による測定誤差は定常状態では約0.5℃以下、ウエハの挿入・取出に伴ってウエハ温度が炉内壁温度より250℃低い状態で10～20℃、150℃低い状態で約5℃である.
- (3) 炉内への挿入・取出を含む60分間のウエハ温度を測定した結果、定常状態では本測定による放射温度計の測定値は±2℃以内の差で熱電対の測定値と一致した.

第3章 縦型拡散装置の ウエハ温度分布解析

3.1 背景

半導体製造工程の酸化拡散プロセスでは、多数（数十枚）のシリコンウエハを一定間隔に並べて処理するバッチ拡散装置を用いて、通常、大気圧で電気ヒータにて800～1200℃に数十分間から数時間加熱することにより、シリコン基板中への不純物の拡散、結晶損傷の回復、熱酸化膜の形成などの処理が行われる。古くはウエハを横方向からヒータ内に出し入れする横型拡散装置が用いられていた。ところが横型拡散装置はウエハ出入時に装置内へ外気が混入し、熱処理のばらつきが大きくなるため、最近では図 3-1、図 3-2 に示す縦型拡散装置が主に用いられている⁽⁴²⁾。円筒形の電気ヒータの内側に、SiC 管と石英管を設け、その中に処理ガス（N₂、O₂、H₂O など）を流す。装置の下方から石英ボートに並べられたウエハとキャップ（断熱材）を挿入する。ヒータは軸方向に 4 ゾーンに分割され、各ゾーンの発熱量はヒータ中に挿入したモニタ熱電対の温度が与えられた設定温度になるように PID（Proportional Integral Derivative）制御される。精度良い熱処理を行うためにはヒータ発熱量制御の適正化が重要である。特に、縦型拡散装置では、装置高さの制約からヒータ全体に対するウエハ熱処理領域の割合を増す必要があり、さらに、均一熱処理やウエハ大直径化の要求に対応するため、温度分布低減を目的としたヒータ発熱量制御の適正化やウエハ配列間隔、挿入・取出速度の適正化の検討が必要となる。

1.2 節に述べたように、これまでにバッチ拡散装置の温度分布解析や実験が、Hu⁽²⁾、空屋ら⁽³⁾、小田ら⁽⁴⁾、清水ら⁽⁵⁾、Schravendijk ら⁽⁶⁾などから報告されている。また、平澤ら⁽³⁴⁾はウエハ列を縦型拡散装置に挿入する場合について、ウエハを不透明な鏡面反射面と仮定し、実験結果に基づいた解析モデルを用い、装置内壁温度分布を与えたときのウエハ面内温度差と、ウエハ直径、間隔、挿入速度との関係について計算し、無次元図表を作成した。

本章では、縦型拡散装置において高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発を目的として、ヒータ発熱量を PID 制御させたときの、装置とウエハの過渡温度変化を計算する軸対称二次元放射伝熱解析プログラムを作成し、ウエハ列の挿入・取出中も温度分布を正しく評価する。さらに本プログラムを用い、定常時のヒータ内空間温度分布、挿入時のウエハ温度上昇特性に及ぼすヒータ発熱量制御の影響や、ウエハの透過の影響、ウエハ面内温度差に及ぼす挿入・取出速度の影響などを計算する。

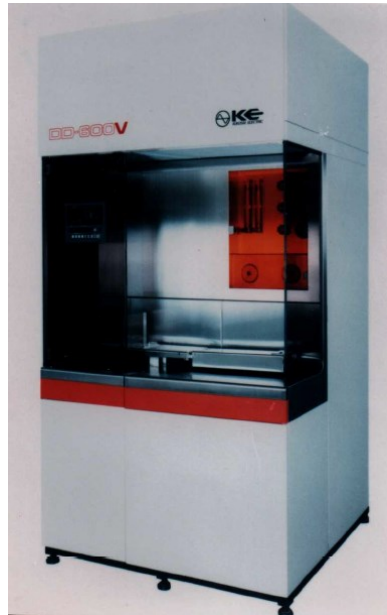


Fig. 3-1 Outside view of vertical diffusion furnace.

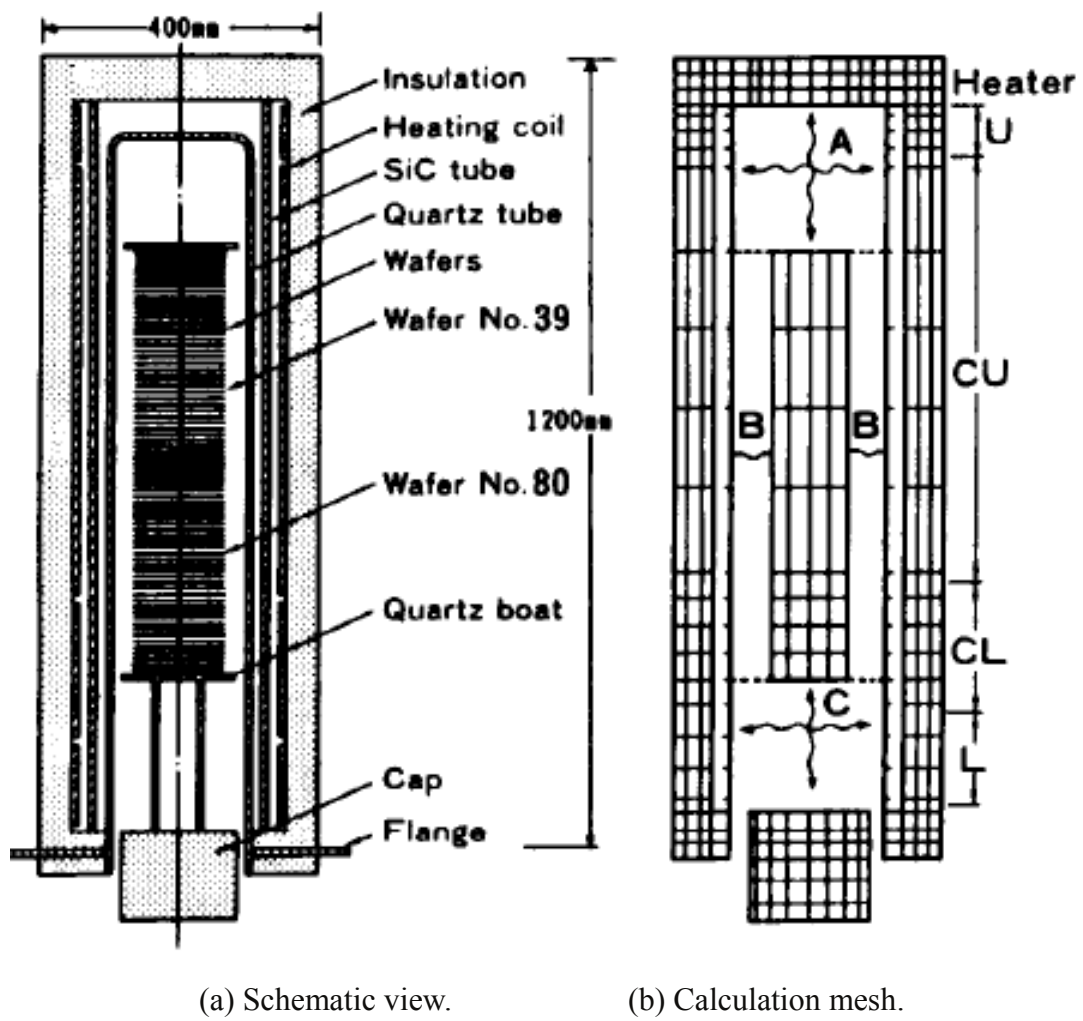


Fig. 3-2 Vertical diffusion furnace.

3.2 伝熱計算プログラム

図 3-2(a)に縦型拡散装置の垂直断面図を示す。ヒータ発熱量を PID 制御させたときの、装置とウェハの軸対称二次元温度分布の時間変化を計算するプログラムを作成する。プログラムは装置温度計算とウェハ面内温度計算の二つで構成されている。前者はウェハ列を円柱物体で近似し、装置温度を計算する。後者は、前者で計算した装置内壁（SiC 管）の温度分布を境界条件として、対象とするウェハの面内温度分布を計算する。また、本プログラムは挿入・取出中のウェハ列の一部が装置に入っている場合や、ウェハ列がない場合も計算する。

3.2.1 装置温度計算

図 3-2(b)に装置温度計算の格子分割を示す。計算に次の仮定を用いる。

- (1) ウェハ列を円柱物体で近似し、軸方向の熱伝導率として 1000℃での放射伝熱の換算値 2W/(m・K)を用い、半径方向の熱伝導率としてシリコンの 800℃の値 27.4W/(m・K)を用いる。
- (2) 石英管の影響を無視し、SiC 管は厚さ方向に温度一定とする。
- (3) SiC 管とウェハとの放射伝熱計算は図 3-2(b)に示す A～C の領域に分けて行う。異なる領域間の伝熱はないとし、領域 B では半径方向のみの放射伝熱を計算する。伝熱表面はすべて灰色体とする。
- (4) ヒータと SiC 管は半径方向のみの放射伝熱を計算する。
- (5) 装置内部のガス対流の影響を無視する。
- (6) 外気温度を 22℃とし、自然対流と放射伝熱を合わせた装置外壁の熱伝達率を、実験結果を参考にして外周面 11 W/(m²・K)、上下端面 17 W/(m²・K)とする。

装置とウェハの非定常熱伝導方程式は次式となる。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (3.1)$$

ここで、 ρ ：密度、 C_p ：比熱、 λ_r 、 λ_z ： r ならびに z 座標方向の熱伝導率、 Q ：放射伝熱により吸収される熱量と発熱量の和、である。

放射伝熱計算に関し、囲まれた空間（図 3-2(b)の領域 A、C）の内壁を m 個の要素に分割したとき、面要素 i に流入する熱流束 q_i は次式で計算される。

$$q_i = -G_i + \sum_{k=1}^m G_k F_{ik} \quad (3.2)$$

$$G_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{k=1}^m G_k F_{ik} \quad (3.3)$$

ここで、面要素 i の温度と射度を T_i , G_i とする．形態係数 F_{ik} の計算には文献⁽³⁶⁾の式を用いた．拡散装置内にウエハ列がない場合の空間温度 T_i は空間中に微小球を入れたときに放射伝熱により定常となる温度と仮定し、次式で計算した．

$$T_i = \left(\sum_{k=1}^m G_k F_{ik} / \sigma \right)^{0.25} \quad (3.4)$$

ヒータの発熱量 Q_g は 4 ゾーンごとに（上から U, CU, CL, L ゾーンと呼ぶ），モニタ温度 T が設定温度 T_s になるように PID 制御され，次式で計算される．モニタ温度 T はヒータ温度と均熱管温度の平均値を用いた．

$$Q_g = C_1 \left[(T - T_s) + \frac{1}{C_2} \int_0^t (T - T_s) dt + C_3 \frac{d(T - T_s)}{dt} \right] \quad (3.5)$$

ここで、 C_1 ：ゲイン， C_2 ：積分時間， C_3 ：微分時間であり，本報では $C_1=0.1\text{W}/^\circ\text{C}$ ， $C_2=60\text{s}$ ， $C_3=10\text{s}$ とした．

数値計算は式(3.1)に陰的差分法を用いる．放射伝熱のある表面要素の温度計算は式(3.1)～(3.3)から導かれる 4 次式をニュートン・ラプソン法で解いた．ヒータ発熱量は式(3.5)の積分項に台形公式を用い，微分項に差分法を用いて計算した．また，熱伝導率は，天井断熱材： $0.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，周囲断熱材： $0.2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，SiC 管： $40\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ とした．

3.2.2 ウエハ面内温度計算

ウエハを不透明な鏡面反射面と仮定した場合のウエハ面内温度差の計算については文献⁽³⁴⁾に報告されている．しかし，低温のシリコンウエハは赤外波長域で半透明になるため⁽²¹⁾，ここではウエハの透過を考慮した計算方法を用いた．ウエハ列の 7 箇所（図 3-2 のウエハ列の両端を除いた 7 箇所の格子位置）にあるウエハを計算対象とする．図 3-3 に計算モデルを示す．計算に次の仮定を用いる．

- (1) 対象とする各ウエハに対して、それを中心として 22 枚のウエハ列を考える．
ウエハ列の両端 $j=1$ と 22 は放射率が 1.0 で，温度がその位置に対応する装置内壁温度に等しいとする．
- (2) 装置内壁とウエハの隙間を無視し，装置内径がウエハ直径に等しいとする．
- (3) 各ウエハは厚さ方向に温度一定とする．
- (4) ウエハを透過のある鏡面反射面とし，放射率 ε_w ，反射率 ρ_w ，透過率 τ_w をウエハ面内平均温度 $T(\text{K})$ の関数として次式で近似する⁽²⁰⁾⁽²¹⁾．

$$\begin{aligned}
\varepsilon_w &= 0.2 & (T \leq 543 \text{ K}) \\
\varepsilon_w &= 0.0021 T - 0.944 & (543 \text{ K} < T \leq 783 \text{ K}) \\
\varepsilon_w &= 0.7 & (T > 783 \text{ K}) \\
\rho_w &= 0.15 \\
\tau_w &= 1 - \varepsilon_w - \rho_w
\end{aligned} \tag{3.6}$$

(5) 装置内壁の放射率 ε_v を実験パラメータとし、文献⁽³⁴⁾と同様に、挿入時の 600°Cにおけるウエハ中心温度上昇速度の計算結果が実験結果に一致するように $\varepsilon_v=0.38$ とする。その際、装置内壁の反射を無視し、この仮定を用いた計算結果と実験結果が一致するように装置内壁の放射率 ε_v を定めた。

放射伝熱計算では、ウエハ $j=j_A$ 上の面要素 $i=i_A$ から出た放射エネルギーが、 k 回の反射と m 回の透過を経て、ウエハ $j=j_B$ 上の面要素 $i=i_B$ に伝わる伝熱量 ΔQ を次式で求める。なお、装置内壁も一つの面要素と考える。

$$\Delta Q = \varepsilon_A \varepsilon_B \rho_1 \rho_2 \cdots \rho_k \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_k \times \sigma T_A^4 F_{AB} S_B \tag{3.7}$$

ここで、 $\varepsilon_A, \varepsilon_B$ ：ウエハ $j=j_A$ と j_B の放射率、 $\rho_1 \dots \rho_k$ ：反射する各ウエハの反射率、 $\tau_1 \dots \tau_m$ ：透過する各ウエハの透過率、 F_{AB} ： $(|j_A - j_B| + k + m)$ 枚だけ離れた 2 枚のウエハ上の面要素 $i=i_A$ から面要素 $i=i_B$ に対する形態係数、 S_B ：面要素 $i=i_B$ の面積である。図 3-3 の矢印で示すように、すべての面要素間に対して $(k+m) \leq 5$ の範囲で式(3.7)を計算し、放射伝熱量を求める。

ウエハ内の非定常熱伝導方程式は式(3.1)の右辺第 2 項を除いたものであり、陽的差分法を用いて数値積分し、時間ステップは急激な温度変化がない限り 1 s とした。

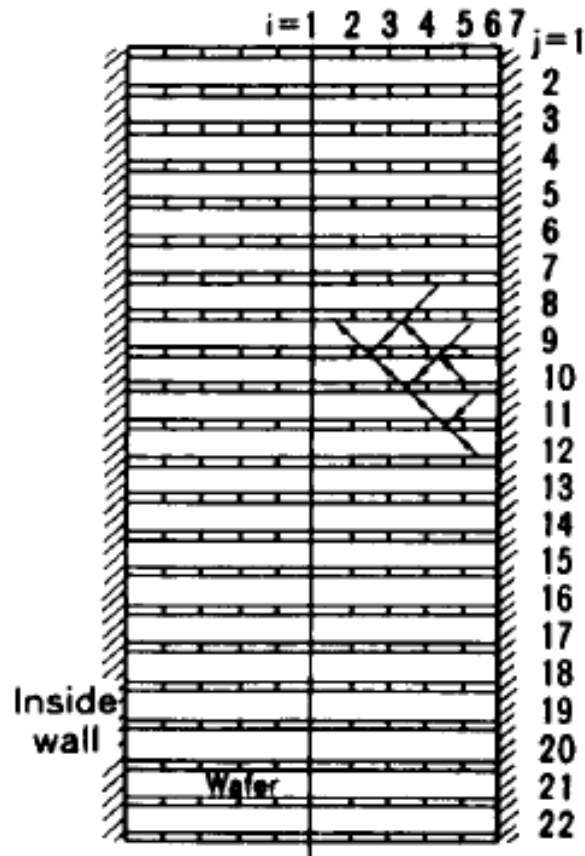


Fig. 3-3 Model for calculating temperature distribution in wafers.

3.3 計算結果

3.3.1 定常時のヒータ内空間温度分布

拡散装置内にウエハ列がない場合に中心軸上の定常空間温度が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 内に入る領域の長さを均熱長と呼び、均熱長が大きいほど装置の処理能力が優れていることを表している。図 3-4 に、実用的な範囲で均熱長が最大となるように 4 ゾーンヒータの分割比率と発熱量を適正化したときの、空間温度分布と発熱量を示す。均熱長がヒータ全長の 70% 以上になる（横型拡散装置では約 40%）。計算結果の妥当性を確認するため、国際電気（株）製の縦型拡散装置を用い、実験を行った。図 3-4 に熱電対を用いて中心軸上の空間温度を測定した結果（○印）を示す。熱電対による温度測定精度は 0.5°C 程度であり、この範囲で計算と実験が良く一致している。

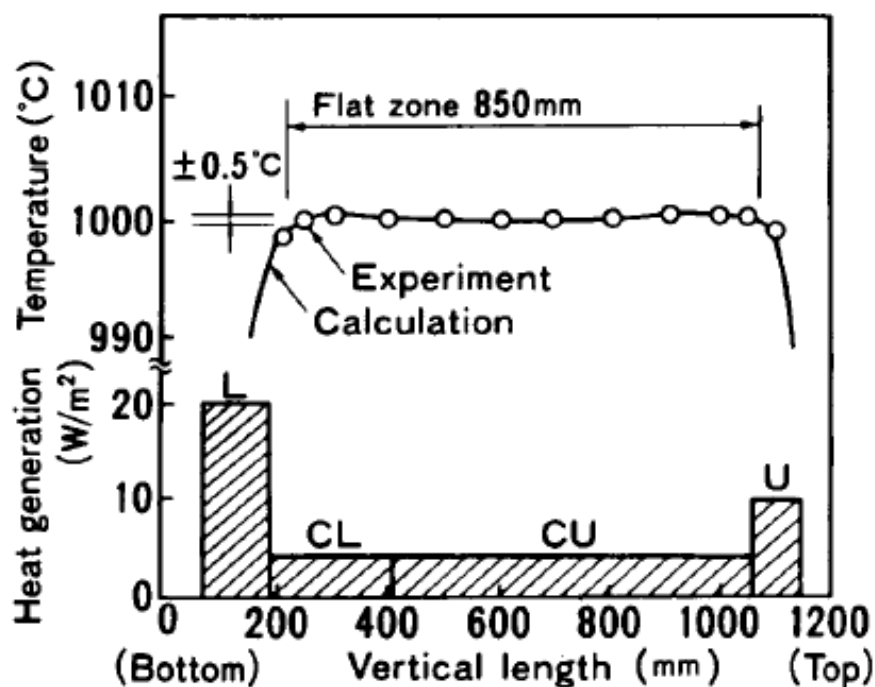


Fig. 3-4 Heating power generation and steady-state axial temperature distribution in vertical diffusion furnace.

3.3.2 挿入時のウエハ温度上昇特性

ウエハ列を拡散装置内に挿入したときに、ウエハの温度をオーバシュートさせることなしに、できるだけ速く熱処理温度まで上昇させることが必要である。図 3-5、図 3-6 に、ウエハ列を挿入したときのウエハ中心温度と SiC 管温度の時間変化を示す。計算条件は、ウエハ直径 150mm, 厚さ 0.55mm, 間隔 5.4mm, 装置内部温度 1000°C, 挿入速度 1.7mm/s で、全ウエハ枚数 112 枚のうち先端から 39, 80, 100 枚目のウエハの温度変化を示した。図 3-5 はヒータ設定温度を一定に保った場合、図 3-6 は挿入時に下方の CL と L ゾーンのヒータ設定温度を高くし、上方の U ゾーンのヒータ設定温度を低くした場合（フィードフォワード制御と呼ぶ。以下 FFC と略す。）の計算結果である。低温のウエハ列を挿入すると SiC 管の挿入口近傍の温度が低下するため、ヒータ設定温度を一定に保った場合には（図 3-5）、下部のウエハが熱処理温度に達するまでに長い時間がかかる。FFC を用いると（図 3-6）、温度上昇時間が速くなることがわかる。図 3-7 は FFC を用いたときの装置全体の温度分布の時間変化を示す。

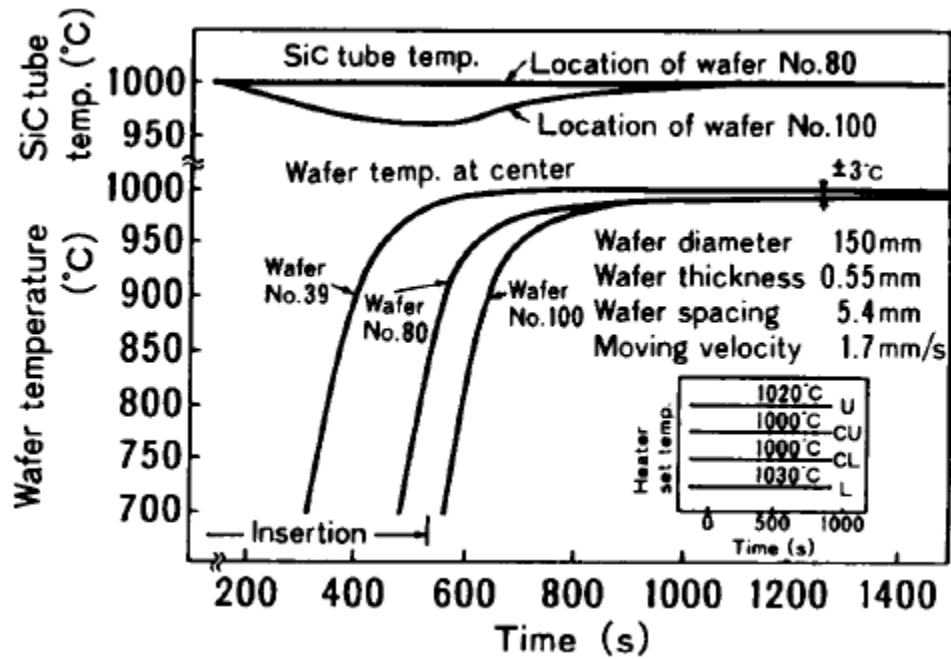


Fig. 3-5 Time dependence of wafer and SiC tube temperature at insertion (constant heater set points).

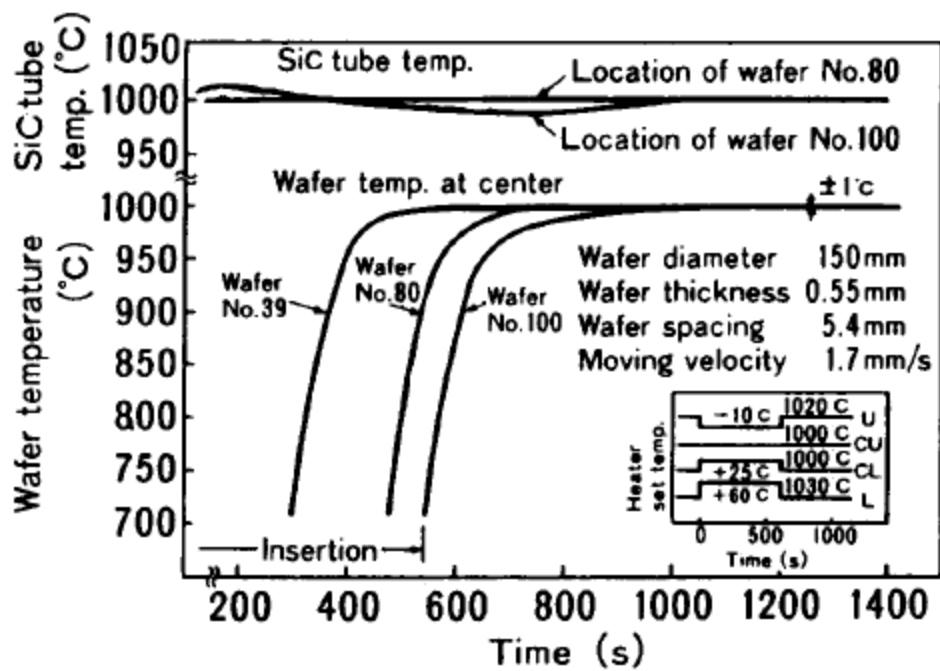


Fig. 3-6 Time dependence of wafer and SiC tube temperature at insertion (feed-forward control of heating power).

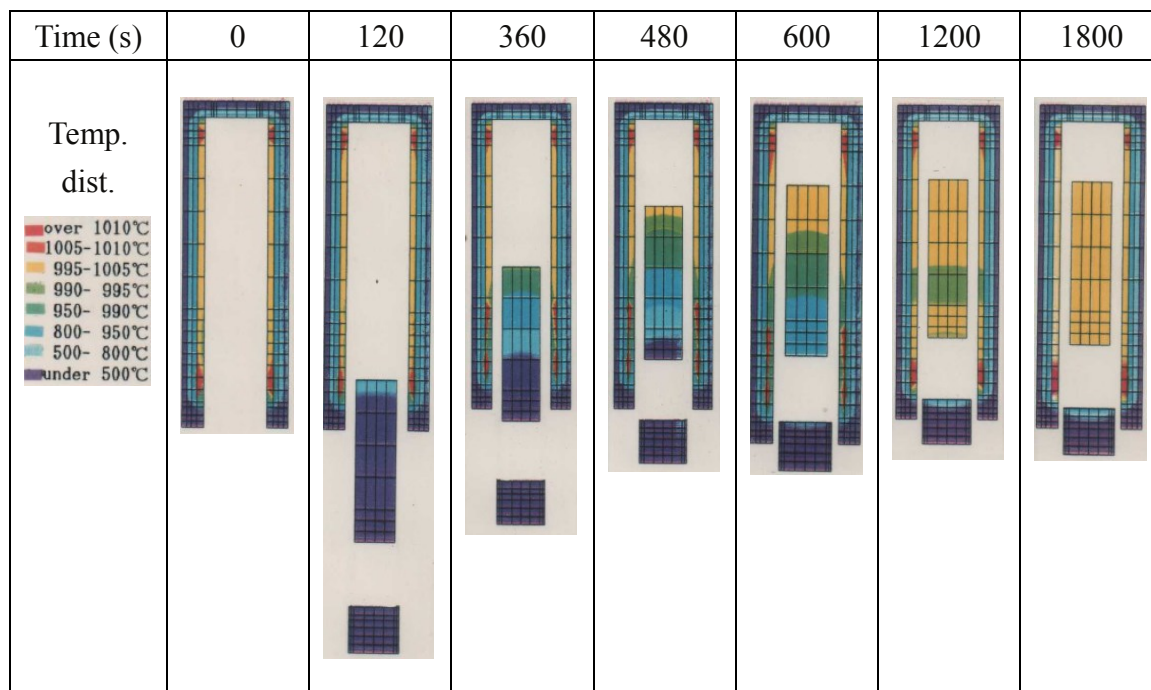


Fig. 3-7 Change of temperature distribution in vertical diffusion furnace and wafers.

3.3.3 挿入時のウェハ面内温度差

まず、挿入時のウェハ面内温度差に及ぼすウェハ透過の影響を検討する。図 3-8 に、挿入時のウェハ中心と周縁から 10mm 内側の温度の時間変化を計算した結果と実験結果を比較して示す。計算では、装置温度の時間変化の計算を行わず、装置内壁温度分布を挿入口 500°C、中央 1000°C、挿入口近傍の温度勾配 3°C/mm と仮定し、ウェハの初期温度 130°C とした。実線はウェハの透過を考慮した計算結果、破線はウェハを不透明と仮定した計算結果である。ウェハを不透明と仮定した計算と文献⁽³⁴⁾との差は、ウェハ放射率 ε_w を式(3.6)と同様に温度の関数とし（反射率は $\rho_w = 1 - \varepsilon_w$ ）、初期温度を合せた点である。実験結果を○、△印で示す。実験の発熱条件は、挿入完了直後の 5 分間に CL、L ゾーンの設定温度を高くする FFC を用いた。計算結果と実験結果が 600°C にて重なるように時間軸を移動して示してある。透過を考慮した計算結果（実線）と実験結果は全温度範囲ではほぼ一致している。不透明と仮定した計算結果（破線）は低温で実験結果と差が生じるが、600°C 以上にて実験結果と良く一致している。ウェハに熱応力欠陥が生じるのは 800°C 以上でのウェハ面内温度差によるものであり、熱応力欠陥の発生有無を検討する目的では、ウェハを不透明な鏡面反射面に近似した計算で十分であることがわかった。そこで以下の検討にはウェハを不透明とした解析モデルを用いる。

図 3-9 に、挿入時にヒータ設定温度を一定にした場合と FFC を用いた場合のウェハ面内温度差の変化を比較して示す。計算条件は図 3-5、図 3-6 と同じである。FFC を用いると装置内壁温度が高くなるため、ウェハ面内温度差が少し増加することがわかる。

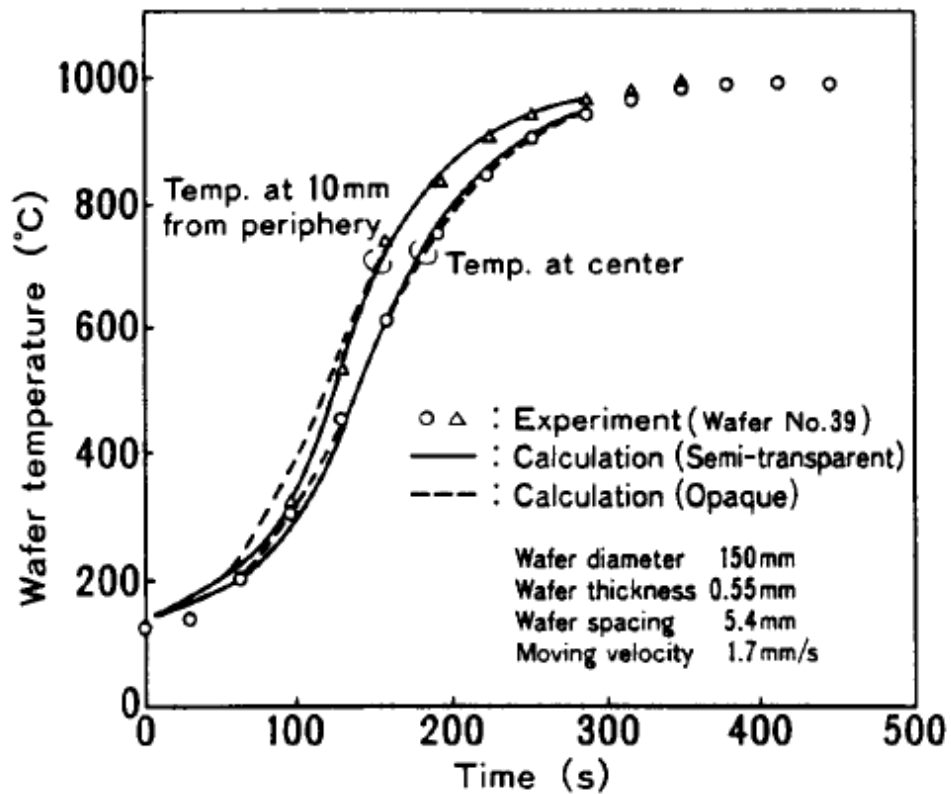


Fig. 3-8 Effect of silicon radiative properties on the time dependence of wafer temperature during insertion.

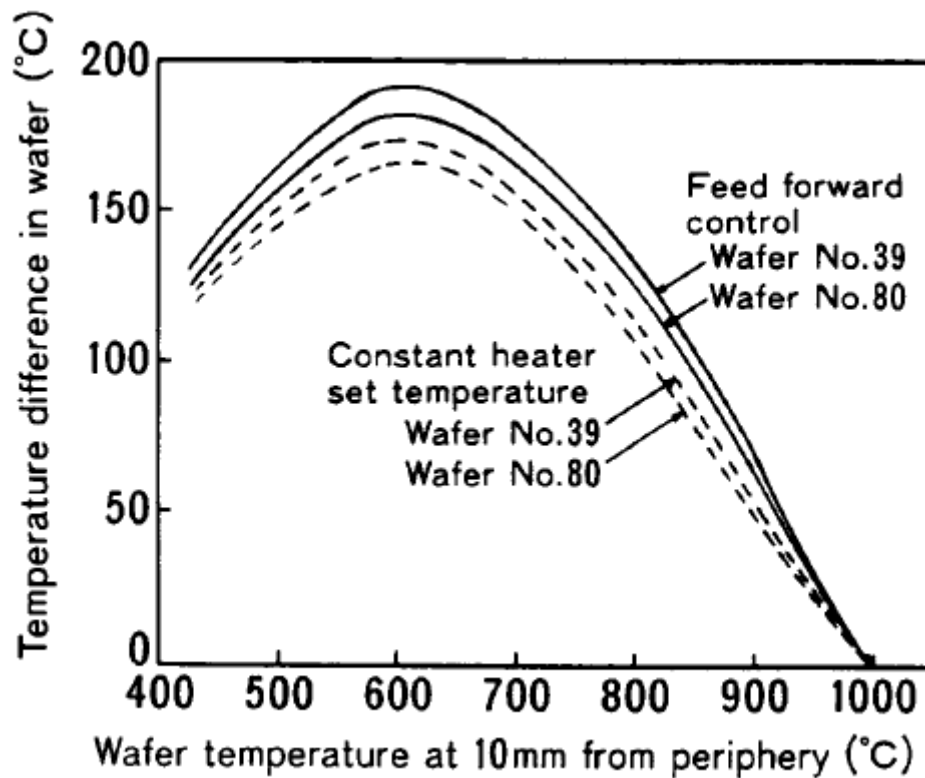


Fig. 3-9 Temperature difference as a function of wafer temperature during insertion.

3.3.4 取出時のウエハ面内温度差

図 3-10 に、挿入から取出までのウエハ面内温度差をウエハ周縁から 10mm 内側の温度に対してプロットしたグラフを示した。計算条件は図 3-8 と同じである。さらに、ウエハに熱応力欠陥が発生する限界のウエハ面内温度差を破線で示した。挿入時よりも取出時に熱応力欠陥が発生する可能性が高いことがわかる。これは、縦型拡散装置の挿入口近傍での温度勾配が横型拡散装置より大きいために生ずる現象で、横型拡散装置ではウエハ挿入・取出速度が大きい場合に相当し、その場合において取出時の方が熱変形が大きいという清水ら⁽⁵⁾の結果と一致する。ただし、欠陥発生限界は文献によって 10 倍ぐらいのばらつきがあり⁽³⁴⁾、図 3-10 の破線は、ばらつきの範囲内でやや小さめの値を使用しているため、図 3-10 と同じ条件の実験では熱応力欠陥が発生しなかった。

文献⁽³³⁾と同様に以下に示す無次元数を用いて、内部温度 1000℃、挿入口温度 500℃の拡散装置からウエハ列を取出す場合において、ウエハ周縁温度が 950℃になるときのウエハ面内温度差 ΔT_{950} に及ぼすウエハ半径 R 、厚さ h 、間隔 p 、取出速度の無次元図表を作成する。

$$p^* = p/R \quad (3.8)$$

$$N^* = h\lambda_c / (R^2 \varepsilon_v \sigma T_{vc}^3) \quad (3.9)$$

$$U^* = -\frac{dT_v}{dt} \frac{hR\rho C_p}{p\varepsilon\sigma T_{vc}^4} \quad (3.10)$$

ここで、 T_{vc} ：装置内部温度（本報では 1273K）、 λ_c ：代表熱伝導率（27.4W/(m・K)）、 dT_v/dt ：ウエハから見た周囲温度上昇速度であり挿入口近傍の装置内壁温度勾配と挿入速度の積、 ρ ：密度（2330kg/m³）、 C_p ：比熱（932J/(kg・K)）、 ε_v ：装置内壁放射率（0.38）である。

図 3-11 に、取出速度が非常に大きい場合のウエハ面内温度差 ΔT_{950} と無次元ウエハ間隔 p^* 、熱伝導と放射伝熱の比 N^* との関係を示す。ウエハ間隔がウエハ半径の約 5%のときにウエハ面内温度差が最大となることがわかる。図 3-12 に、取出速度が非常に速い場合の値（図 3-11 の値）で基準化したウエハ面内温度差 $\Delta T_{950}/\Delta T_{s950}$ と無次元取出速度 U^* との関係を示す。取出速度を遅くするとウエハ面内温度差が減少することがわかる。取出速度の影響が表われ始める無次元取出速度は $U^*=10$ であるが、挿入速度の影響が表われ始める無次元挿入速度は $U^*=1$ であり、熱応力欠陥の発生を防止するための適正な挿入速度と取出速度は異なることがわかる。図 3-10 の条件は $p^*=0.072$ 、 $N^*=0.06$ 、 $U^*=1.5$ である。図 3-11、図

3-12 は熱応力欠陥の発生を防止するウェハ配列間隔, 取出速度などの適正条件の設計に活用できる。

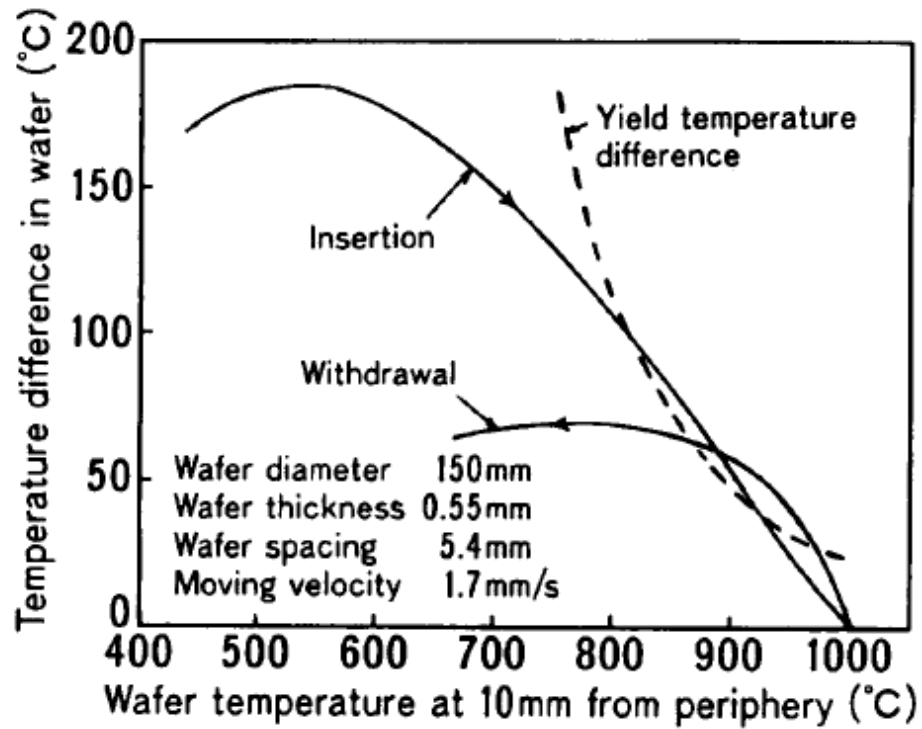


Fig. 3-10 Temperature difference as a function of wafer temperature during insertion and withdrawal.

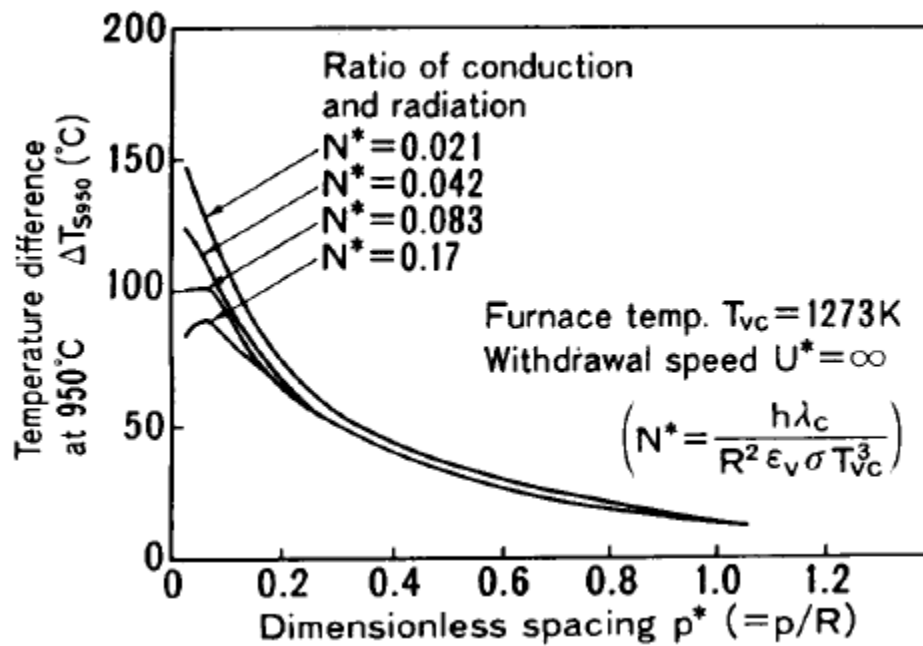


Fig. 3-11 Effect of wafer spacing, thickness and diameter on temperature difference when wafer are withdrawn quickly.

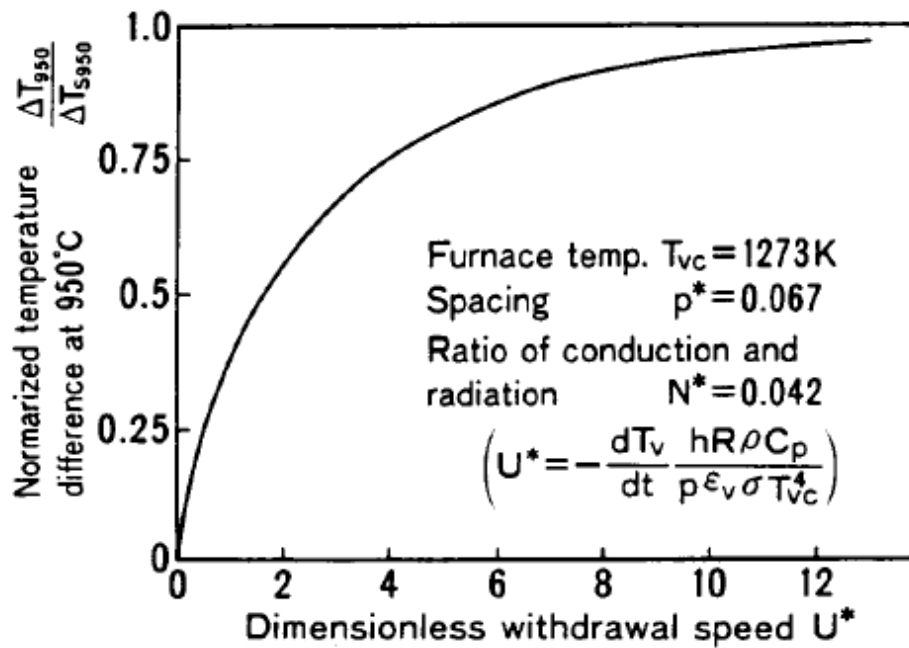


Fig. 3-12 Effect of withdrawal speed on temperature difference.

3.4 本章のまとめ

- (1) 本章では、縦型拡散装置において高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発を目的として、ヒータ発熱量制御，ウエハ熱処理条件を与えたときに，ウエハ温度分布の時間変化を計算するプログラムを開発した．
- (2) ヒータ発熱量にフィードフォワード制御（挿入時に挿入口近傍のヒータ設定温度を高くする）を用いると，ウエハ列の温度上昇速度を速くすることができる．
- (3) 縦型拡散装置では挿入時より取出時に熱応力欠陥が発生する可能性が大きい．取出時のウエハ面内温度差に及ぼすウエハ直径，厚さ，間隔，取出速度の影響について無次元図表を作成した．

第4章 縦型低圧 CVD 装置の 成膜反応プロセス解析

4.1 背景

LSI の高集積化に伴い、半導体製造装置の高性能化に対する要求はますます厳しくなっている。ウェハ上に薄膜を堆積させる CVD 装置では、大口径ウェハへの均一成膜が大きな課題である。この課題を解決するには反応室内における流れやガス濃度分布を正確に把握することが不可欠であり、ウェハ上に堆積する薄膜の成長速度を予測する成膜シミュレーションの重要性が高まっている。一般に、成膜シミュレーションは気体の流れと化学反応を同時に解くため計算に時間がかかる。特に数十枚のウェハを一度に処理する縦型低圧 CVD 装置では、メッシュ分割を細かくする必要があるため、その傾向がよりいっそう顕著になる。

1.2 節に述べたように、これまでに CVD 装置における成膜反応プロセスについて、Roenigk ら⁽⁷⁾、反田ら⁽⁸⁾、霜垣ら⁽⁹⁾、Lin ら⁽¹⁰⁾、Sachs ら⁽¹¹⁾、Guo ら⁽¹²⁾、Carlen ら⁽¹³⁾、Gumpher ら⁽¹⁴⁾、Morosanu ら⁽¹⁵⁾、DePinto⁽¹⁶⁾、Theodoropoulou⁽¹⁷⁾などから報告されている。

本章では、縦型低圧 CVD 装置において高速に解析できる成膜反応解析手法の開発を目的として新たに考案したネットワーク反応解析モデル、ならびに、その反応解析モデルを用いて Si_3N_4 膜、TEOS- SiO_2 膜、Poly-Si 膜の成膜シミュレーションを行った結果を述べる。

4.2 縦型低圧CVD装置のネットワーク反応解析モデル

4.2.1 縦型低圧CVD装置の構造

図 4-1 に、縦型低圧 CVD 装置の反応室の断面を示す。この装置は数十～数百 Pa に減圧された円筒形反応室の中に数十枚のウェハを入れて 500～800℃程度に加熱し、そこに反応性の原料ガスを流して、ウェハ表面に薄膜を堆積させる装置である。反応室はインナーチューブとアウターチューブと呼ぶ二重の石英管からなり、ウェハはその中に石英ボート（図示せず）に載せて保持される。ウェハ間隔は数 mm 程度である。石英管の外側にはヒータを設け、石英管ごとウェハを加熱する構造となっている。また、ウェハの下方には熱放射によるウェハからの放熱を低減するために、遮熱板（ウェハと同一直径の耐熱円板）を数枚設置する。原料ガスはインナーチューブの中に下方から流入し、その後、ウェハとインナーチューブの間を上に向かって流れる間に反応し、ウェハやインナーチューブの表面に膜を堆積させる。堆積しなかったガスは反応室の上端で流れ方向が反転し、インナーチューブとアウターチューブの間を通過して下方の出口から流出する。反応室の構造がほぼ軸対象であるため、内部の温度分布や流れもほぼ軸対称になる。

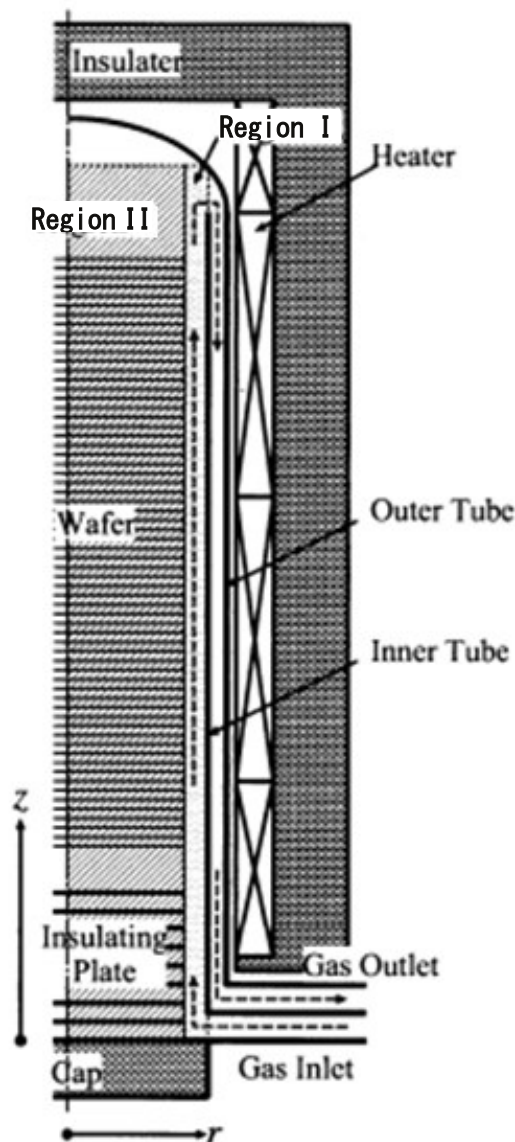


Fig. 4-1 Vertical LPCVD reactor.

4.2.2 反応解析モデル

本研究では縦型低圧 CVD 装置の内部での定常物質輸送と反応をネットワーク反応解析モデル (Network Model, 以下 NM と略す) で計算する. NM 解析は解析対象を少ない節点数で計算する簡便な解析手法であり, 熱解析によく用いられている⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾. 本研究の目的は, この手法を縦型低圧 CVD 装置の反応解析に適用することで, 精度を維持したまま計算時間を短縮することである. ここで, NM 解析を適用する前提として, 縦型低圧 CVD 装置内の流れが低レイノルズ数 (数十以下) の層流で, 処理条件を変えても流動パターンはほとんど変化しないという仮定をおいている. 実際に通常のプロセス条件範囲では仮定は成立している. こ

の仮定のもとで、二分割した領域間のガスの移動と各領域内における濃度境界層を精度良く近似するモデルを考案した点が、筆者の工夫点である。

図 4-1 に示すように、縦型低圧 CVD 装置の反応室を二つの領域 I と II に分け、その内部での物質輸送と反応をモデル化する。領域 I はウエハ端を結ぶ仮想的な円筒包絡面とインナーチューブの間の空間、領域 II は 2 枚の隣接するウエハに挟まれた円板状の空間である。遮熱板の間、遮熱板とウエハの間、最上位のウエハとアウターチューブ上壁との間なども近似的に領域 II として扱う。

図 4-2 に領域 I, 領域 II 内のガス α の濃度分布（濃度等高線）を模式的に示す。原料ガス入口からの上方向の距離を z ，ウエハ中心からの水平方向の距離を r とする。領域 I 内では z 軸に沿って濃度が低下（変化）すると同時に、インナーチューブやウエハの近傍で濃度が低下する。この濃度分布を計算で求めるために、

- (1) 反応室内の圧力は一様であり、反応室内での温度勾配などによるガスの体積変化も無視できる。
- (2) 反応による吸熱，発熱，体積変化などは無視できる。
- (3) 気相反応は 1 次反応（反応速度が 1 種類の反応ガスの濃度に比例する反応），表面反応は単純な付着反応である。

という仮定のもとで領域 I, 領域 II におけるガスの反応と輸送の支配法的式を導く。

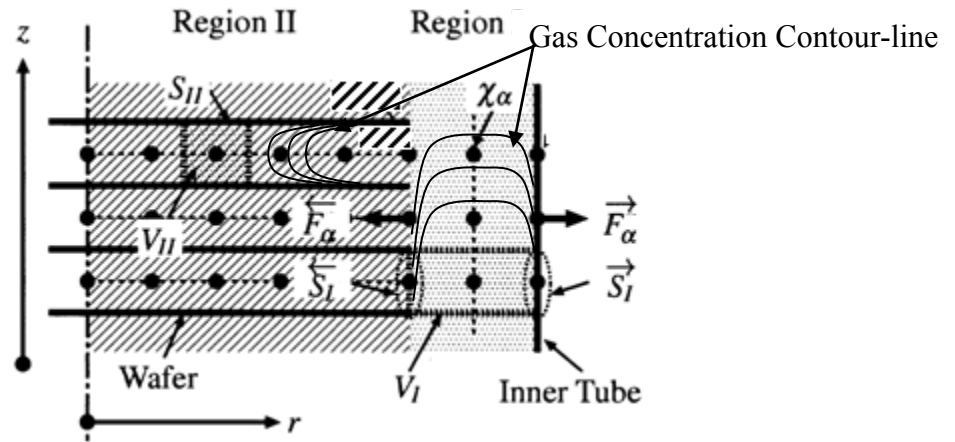


Fig. 4-2 Network model analysis.

4.2.3 領域Iにおける支配方程式

微小空間 V_I 内のガス α の質量保存則より、 z 方向の平均モル分率 $\overline{\chi_\alpha}(z)$ の変化は次の 1 次元移流拡散方程式で表される。

$$u \frac{d\overline{\chi_\alpha}}{dz} = \frac{d}{dz} \left(D_\alpha \frac{d\overline{\chi_\alpha}}{dz} \right) - \overline{F_\alpha} \frac{\overline{S_I}}{V_I} - \overline{F_\alpha} \frac{\overline{S_I}}{V_I} - \sum_{\beta=1}^N k_{\alpha\beta} \overline{\chi_\alpha} + \sum_{\beta=1}^N k_{\beta\alpha} \overline{\chi_\beta} \quad (4.1)$$

ここで、 $\overline{}$ は V_1 内での平均値を示す。また、左辺は移流項を、右辺の第一項は拡散を、第二項、第三項は表面でのガス α の消滅を、第四項は気相反応でのガス α の消滅を、第五項は気相でのガス α の生成を示す項である。境界条件は次式である。

$$\overline{\chi_\alpha} = \hat{\chi}_\alpha \quad (\text{流入側}) \quad (4.2)$$

$$\frac{d\overline{\chi_\alpha}}{dz} = 0 \quad (\text{流出側}) \quad (4.3)$$

ここで $\hat{}$ は既知量を示す。右辺第二項の表面でのガス α の消滅 $\overleftarrow{F}_\alpha$ と $\overrightarrow{F}_\alpha$ は次の式で定義する。

$$\overleftarrow{F}_\alpha = \frac{1}{4} \overline{v_\alpha} \eta_\alpha \chi_\alpha(r_w) \quad (\text{ウエハ周端 } r=r_w) \quad (4.4)$$

$$\overrightarrow{F}_\alpha = \frac{1}{4} \overline{v_\alpha} \eta_\alpha \chi_\alpha(r_i) \quad (\text{インナーチューブ内壁 } r=r_i) \quad (4.5)$$

ここで、 $\chi_\alpha(r)$: 局所モル分率、 $\overline{v_\alpha}$: ガスの平均分子速度、 η_α : 付着確率である。

$\overleftarrow{F}_\alpha$ と $\overrightarrow{F}_\alpha$ は以下の方程式を解いて求める。微小空間 V_1 内で濃度が z 方向に一様で、 r 方向にのみ変化すると仮定すると、ガス α の局所モル分率 $\chi_\alpha(r)$ に関して次の微分方程式が成り立つ。

$$D_\alpha \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\chi_\alpha}{dr} \right) - \sum_{\beta=1}^N k_{\alpha\beta} \chi_\alpha + \sum_{\beta=1}^N k_{\beta\alpha} \chi_\beta = 0 \quad (4.6)$$

境界条件は次式である。

$$\frac{1}{4} \overline{v_\alpha} \eta_\alpha \chi_\alpha(r_w) = D_\alpha \frac{d\chi_\alpha(r_w)}{dr} \quad (\text{ウエハ周端 } r=r_w) \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{4} \overline{v_\alpha} \eta_\alpha \chi_\alpha(r_i) = -D_\alpha \frac{d\chi_\alpha(r_i)}{dr} \quad (\text{インナーチューブ内壁 } r=r_i) \quad (4.8)$$

また、次式の関係がある。

$$\overline{\chi_\alpha}(z) = \int_{r_w}^{r_i} \chi_\alpha(r) 2\pi r dr / \pi(r_i^2 - r_w^2) \quad (4.9)$$

これより $\overline{\chi_\alpha}(z)$ を求めて、 $\overleftarrow{F}_\alpha$ と $\overrightarrow{F}_\alpha$ を算出できる。

4.2.4 領域IIにおける支配方程式

微小空間 V_{II} 内のガス α の質量保存則より, r 方向の平均モル分率 $\overline{\chi_\alpha}(r)$ の変化は次の 1 次元拡散方程式で表される⁽⁹⁾.

$$D_\alpha \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\overline{\chi_\alpha}}{dr} \right) - 2F_\alpha^\uparrow \frac{S_{II}}{V_{II}} - \sum_{\beta=1}^N k_{\alpha\beta} \overline{\chi_\alpha} + \sum_{\beta=1}^N k_{\beta\alpha} \overline{\chi_\beta} = 0 \quad (4.10)$$

ここで, $\overline{}$ は V_{II} 内での平均値を示す. 境界条件は次式である.

$$\frac{d\overline{\chi_\alpha}}{dr}(0) = 0 \quad (\text{ウエハ中心 } r=0) \quad (4.11)$$

$$\overline{\chi_\alpha}(r_w) = \chi_\alpha(r_w) \quad (\text{ウエハ周端 } r=r_w) \quad (4.12)$$

ウエハ中心での対象性から式(4.11)が, 領域Iと領域IIが隣接していることから式(4.12)が与えられる. また, 式(4.10)の左辺第二項は次式で表される.

$$F_\alpha^\uparrow = \frac{1}{4} \overline{v_\alpha} \eta_\alpha \chi_\alpha(z) \quad (\text{ウエハ表面}) \quad (4.13)$$

$F_\alpha^\uparrow$ は以下の方程式を解いて求める. 微小空間 V_{II} 内において, 濃度が z 方向にのみ変化すると仮定する. ガス α の局所モル分率 $\chi_\alpha(z)$ に関して次の微分方程式が成り立つ.

$$D_\alpha \frac{d^2 \chi_\alpha}{dz^2} - \sum_{\beta=1}^N k_{\alpha\beta} \chi_\alpha + \sum_{\beta=1}^N k_{\beta\alpha} \chi_\beta = 0 \quad (4.14)$$

境界条件は W をウエハ間の間隔として次式となる.

$$\frac{1}{4} \overline{v_\alpha} \eta_\alpha \chi_\alpha(z) = D_\alpha \frac{d\chi_\alpha(z)}{dz} \quad (\text{ウエハ表面}) \quad (4.15)$$

$$\overline{\chi_\alpha}(r) = \int_0^W \chi_\alpha(z) dz / W \quad (4.16)$$

これより $\overline{\chi_\alpha}(r)$ を求めることができる.

4.2.5 解析フロー

図4-3に解析フローを示す．最初に節点データを作成し，変数を初期化し，領域IIにおける r 方向の平均モル分率 $\bar{\chi}_\alpha(r)$ と 局所モル分率 $\chi_\alpha(z)$ を計算し，領域 I における z 方向の平均モル分率 $\bar{\chi}_\alpha(z)$ とウエハ周端における局所モル分率 $\chi_\alpha(r)$ を計算し，収束するまで反復計算をする．FORTRANでプログラムを書き，コンピュータで計算を行った．

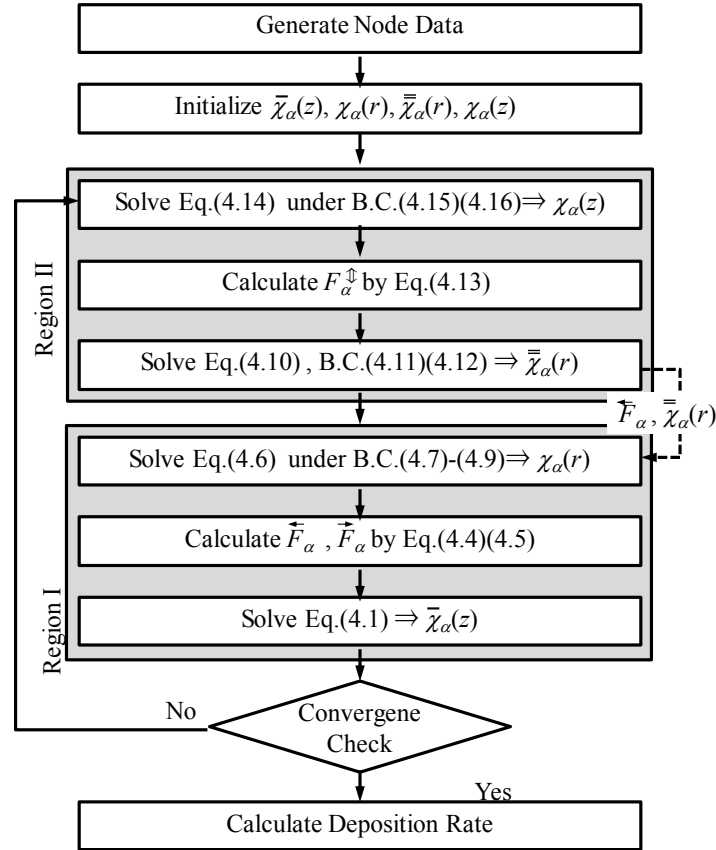


Fig. 4-3 Calculation flow of network model.

4.3 解析モデルの検証

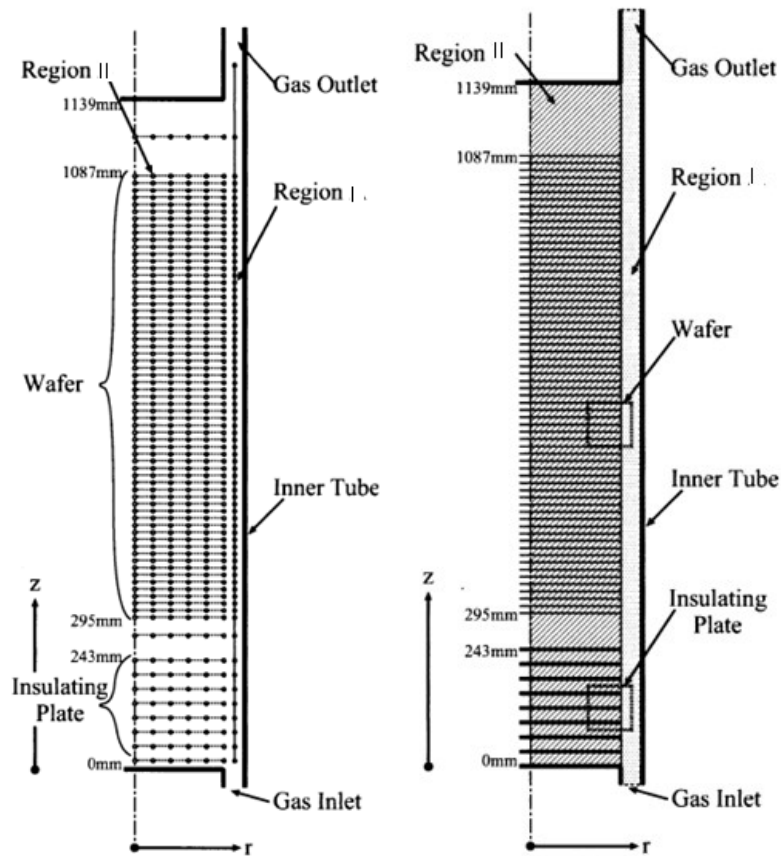
4.3.1 解析方法

Si₃N₄膜, TEOS-SiO₂膜, Poly-Si膜のNM解析を行い, 二次元有限要素法FEM (Finite Element Method) 解析と比較した. NM解析とは解析対象を少ない節点数のかたまりとして計算する簡単な解析手法であり, FEM解析とは解析対象を細かくメッシュ分割して精度良く計算する解析手法である. 図4-4に解析モデルを示す. NM解析では領域I内に60点, 領域Iの1節点に対して領域II内に30点の節点を設けた. 合計で60点×30点=1800点である. FEM解析では反応管内の全体を解析領域とし, 総接点数は約35000点とした. インナーチューブの上端は, NM解析のモデルに合わせてFEM解析の方も円柱形状とした.

成膜条件と反応モデルを表4-1に示す. いずれの反応も不可逆逐次反応とした. Si₃N₄膜では, Roenigkらの文献⁽⁷⁾を参考に原料ガスSiH₂Cl₂と気相反応で生成される中間体SiCl₂が堆積するモデルとした. TEOS-SiO₂膜では, 反田らの文献⁽⁸⁾に従って原料ガスのTEOS (Si(OC₂H₅)₄) と二種類の中間体Si(OC₂H₅)₂(OH)₂, Si₂(OC₂H₅)₆が堆積するモデルとした. Poly-Si膜では, 霜垣らの文献⁽⁹⁾に従って原料ガスのSiH₄と中間体SiH₂が堆積するモデルとした.

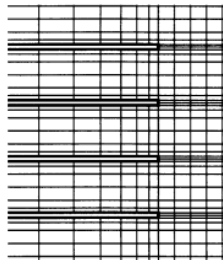
気相反応の反応速度定数, 表面反応の付着確率の値は, あらかじめFEM解析で求めた成膜速度分布が, 実験の成膜速度分布に一致するように求めたものである.

各ガスに対して, 流路中心のモル分率で無次元化した壁面上の無次元モル分率 ψ を計算した結果を表4-2に示す. ψ が1より大幅に小さくなるガスはSi(OC₂H₅)₂(OH)₂とSiH₄の2つである.



(a) NM analysis with 1800 nodes.

(b) FEM analysis with 35000 nodes.



(c) Mesh near wafers for FEM analysis.

Fig. 4-4 Calculation nodes and mesh for NM and FEM analysis.

Table 4-1 Deposition condition and reaction model.

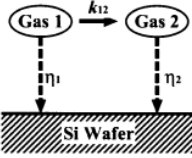
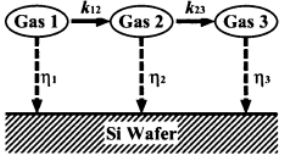
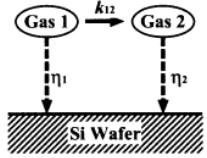
	Si ₃ N ₄	SiO ₂	Poly-Si
Wafer Dia.	200mm	150mm	200mm
Wafer Pitch	6.4mm	6mm	6.4mm
Inner Tube Dia.	30mm	28mm	30mm
Temperature	740 °C	800 °C	580 °C
Pressure	30Pa	53Pa	39Pa
Gas Source	SiH ₂ Cl ₂ =50sccm	TEOS=120sccm	SiH ₄ =500sccm
& Flow Rate	NH ₃ =500sccm	O ₂ =15sccm	N ₂ =490sccm
Reaction Model	 Gas1:SiH₂Cl₂ Gas2:SiCl₄ $k_{12} = 5.6 \times 10^7 e^{-2.0 \times 10^4 / T}$ $\eta_1 = 7.5 \times 10^5 e^{-2.4 \times 10^4 / T}$ $\eta_2 = 3.8 \times 10^5 e^{-2.0 \times 10^4 / T}$	 Gas1:Si(OC₂H₅)₄ Gas3:Si₂(OC₂H₅)₆ Gas2:Si(OC₂H₅)₂(OH)₂ $k_{12} = 5.0 \times 10^{-2}$ $k_{23} = 7.0 \times 10^3$ $\eta_1 = 8.0 \times 10^{-6} (P/53)^{-0.67}$ $\eta_2 = 1.0$ $\eta_3 = 1.0 \times 10^{-4}$	 Gas1:SiH₄ Gas2:SiH₂ $k_{12} = 3.0 \times 10^{16} (P/100)^{2.1} e^{-3.4 \times 10^4 / T}$ $\eta_1 = 1.0 \times 10^{12} e^{-3.4 \times 10^4 / T}$ $\eta_2 = 9.0 \times 10^{-2}$

Table 4-2 Mole fraction rate in region I.

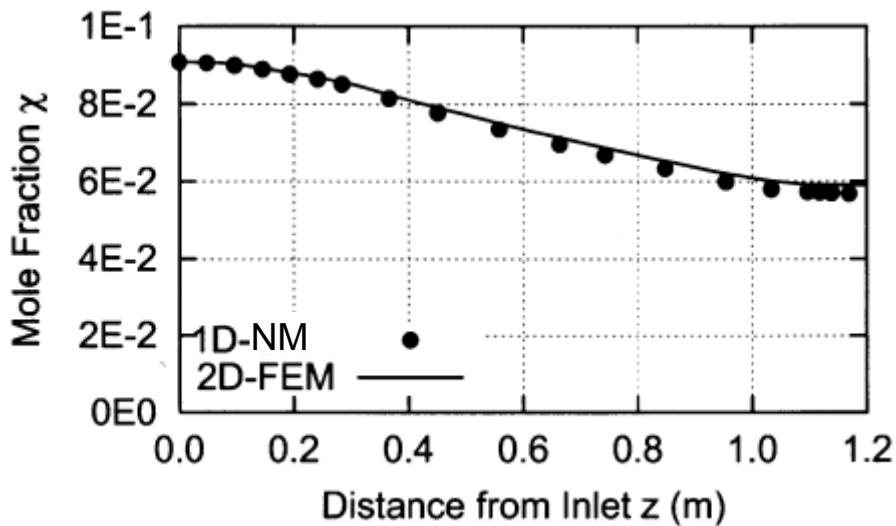
No.	ガス	M (g/mol)	$k_{\alpha\beta}$ (1/s)	$k_{\gamma\alpha}$ (1/s)	η_α	D_α (m ² /s)	B (m)	T (°C)	$\psi(0)$
1	SiH ₂ Cl ₂	101.02	1.50E-01	0.00E+00	3.87E-05	3.28E-01	3.00E-02	740	1.000
2	SiCl ₂	98.992	0.00E+00	1.50E-01	1.00E-03	3.28E-01	3.00E-02	740	0.997
1	TEOS	208.33	5.00E-02	0.00E+00	8.00E-06	1.73E-02	2.75E-02	700	1.000
2	Si(OC ₂ H ₅) ₂ (OH) ₂	152.22	7.00E+03	5.00E-02	1.00E+00	1.73E-02	2.75E-02	700	0.107
3	Si ₂ (OC ₂ H ₅) ₆	326.54	0.00E+00	7.00E+03	1.00E-04	1.73E-02	2.75E-02	700	0.998
1	SiH ₄	32.12	1.52E-02	0.00E+00	3.65E-06	2.06E-01	3.00E-02	580	1.000
2	SiH ₂	30.1	0.00E+00	1.52E-02	9.00E-02	2.06E-01	3.00E-02	580	0.612

4.3.2 解析結果

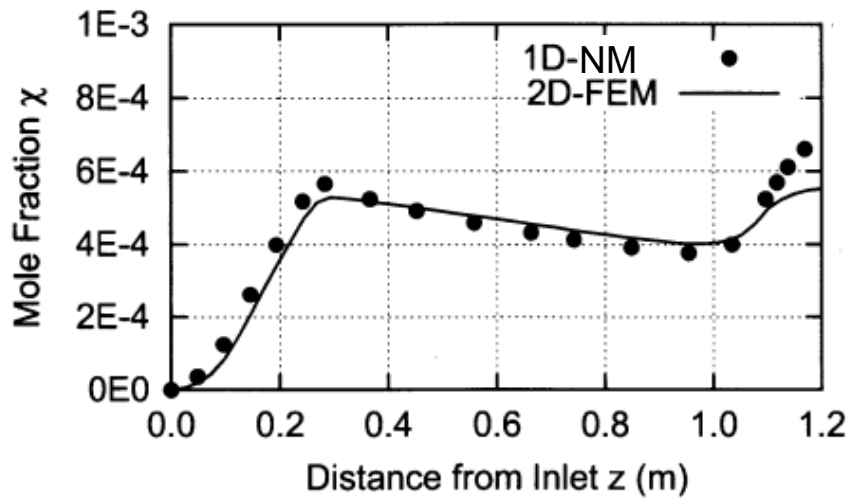
(a) Si_3N_4 膜

図4-5(a), (b)に SiH_2Cl_2 と SiCl_2 の流れ方向の濃度分布を, (c)に流れ方向のウエハ端の成膜速度を, (d)に $z=0.648\text{m}$ のウエハ面内の成膜速度分布を示した.

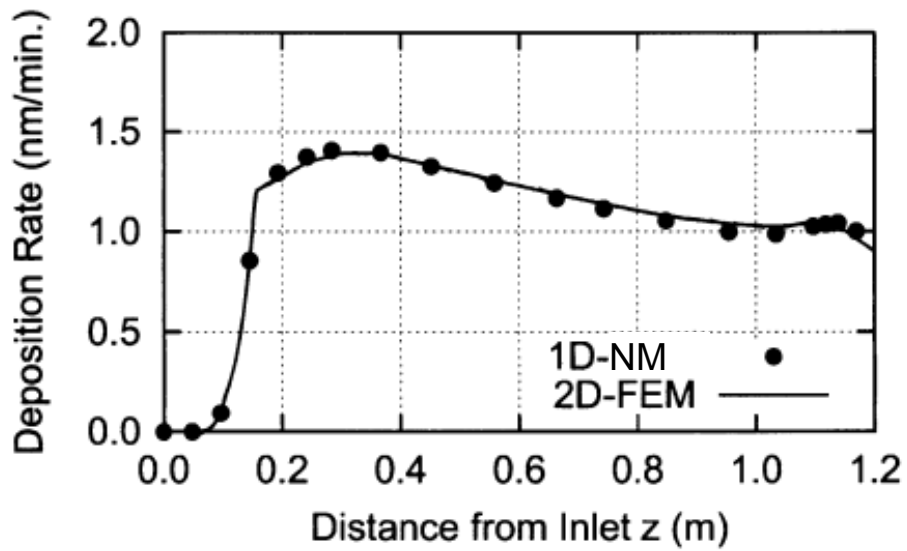
SiH_2Cl_2 と SiCl_2 の流れ方向の濃度分布におけるNM解析とFEM解析の特徴的な違いは, 出口に近い $z=1\sim 1.2\text{m}$ の範囲で中間体 SiCl_2 の濃度に関して両者の差が大きくなる点である. 出口付近では, 図4-4に示したウエハ列上端とアウターチューブ間の隙間の影響によって SiCl_2 の濃度が上昇する. これは, ウエハを入れた区間よりS/V比が小さいため, 中間体の消費量が相対的に少なくなり, 中間体の濃度が上昇するが, その程度がNM解析とFEM解析で異なっている. この差が生ずる原因は, ウエハ列上端とアウターチューブ間の隙間内では「ウエハ面内方向へのガス輸送が拡散のみである.」とした仮定が成り立たなくなっており, 流れの影響が無視できないからと考えられる. ウエハチャージ区間 ($z=0.295\sim 1.087\text{m}$) の流れ方向の濃度分布を見ると, SiH_2Cl_2 と SiCl_2 とも一次元NM解析の方が濃度変化は大きい. ただし, これは3~4%程度の差で良く一致している. さらに, (c)の流れ方向の成膜速度分布もNM解析とFEM解析の差は4%程度と良く一致している. なお, 出口付近の成膜速度に, 先ほど述べた SiCl_2 の濃度上昇の影響が顕著に現れないのは, 全成膜速度に対する SiCl_2 の寄与が小さいからである. (d)のウエハ面内成膜速度分布もNM解析とFEM解析の解析結果の差は8%程度で一致している.



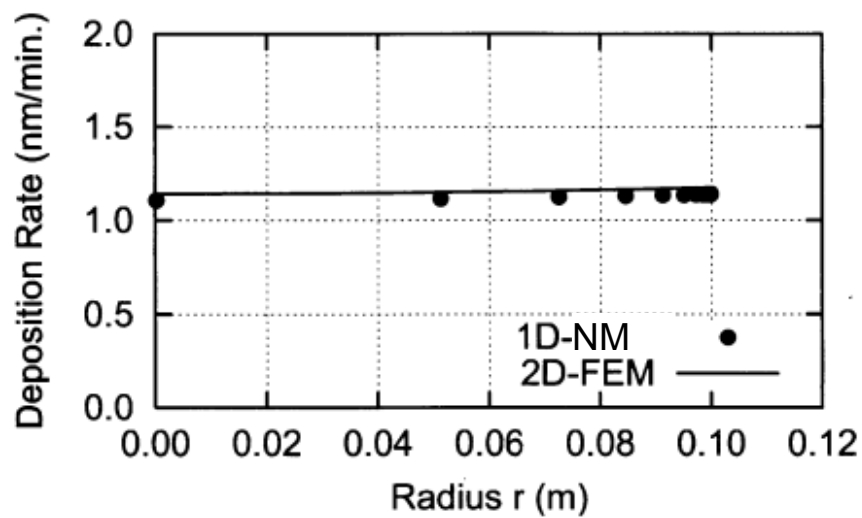
(a) Mole fraction distribution of SiH_2Cl_2 along z direction.



(b) Mole fraction distribution of SiCl_2 along z direction.



(c) Deposition rate distribution along z direction.



(d) Deposition rate distribution along r direction.

Fig. 4-5 Calculation result of Si_3N_4 film.

(b) TEOS-SiO₂膜

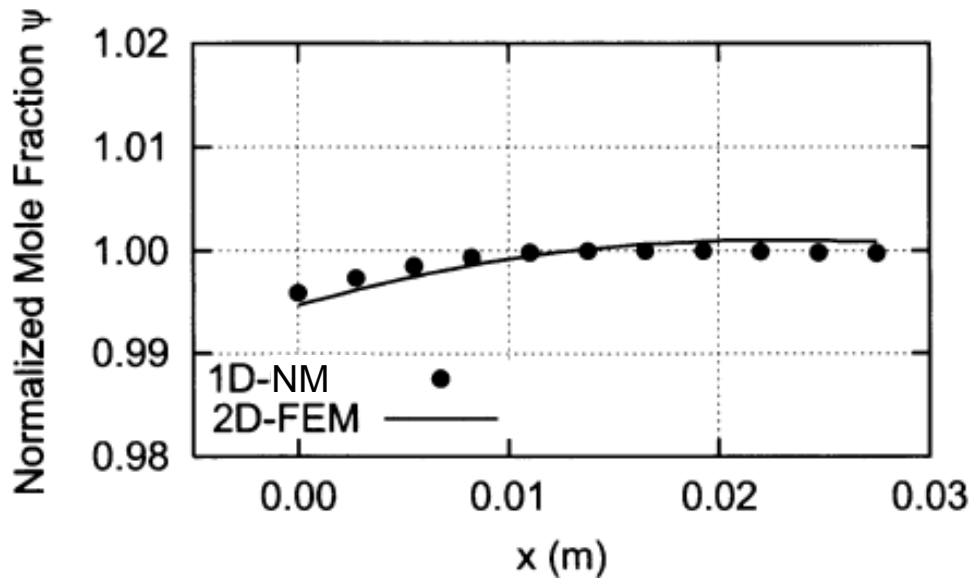
図4-6はNM解析とFEM解析の $z=0.5\text{m}$ 付近における流路断面方向の濃度分布を比較した図である。横軸は流路断面方向の位置 x を示しており、ウエハ端が $x=0\text{m}$ 、インナーチューブ表面が $x=0.0275\text{m}$ である。縦軸は無次元モル分率 ψ である。

図4-6(a)からNM解析、FEM解析ともにTEOS濃度は流路断面方向にほぼ一様であることがわかる。NM解析ではTEOS濃度を一定と仮定して $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$ の濃度分布を求めるが、TEOS-SiO₂膜では妥当な計算結果が得られていることがわかる。

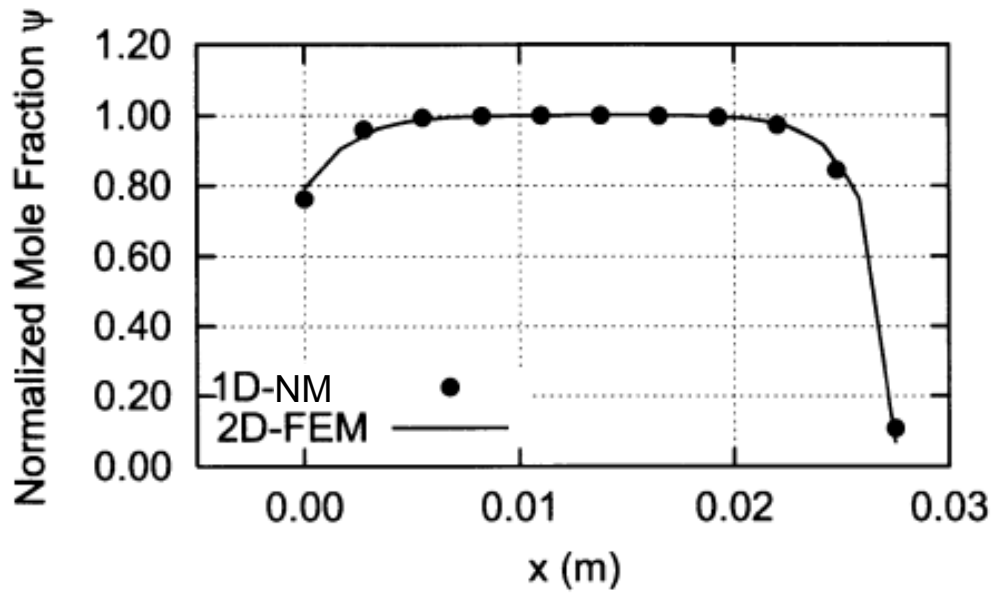
図4-6(b)は中間体 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$ 濃度分布を比較した結果である。ウエハ側ならびにインナーチューブ側のいずれの濃度分布もNM解析とFEM解析の結果は良く一致している。これらの結果から、無次元モル分率 ψ の計算は流路中心と壁面上の濃度差の良い近似を与えていると判断できる。

図4-7(a), (b), (c)にはTEOS, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$ ならびに $\text{Si}_2(\text{OC}_2\text{H}_5)_6$ の流れ方向の濃度分布を、(d)には流れ方向のウエハ端の成膜速度分布を、(e)には $z=0.648\text{m}$ でのウエハ面内の成膜速度分布を示した。

TEOS, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$, $\text{Si}_2(\text{OC}_2\text{H}_5)_6$ の流れ方向の濃度分布を比較する。NM解析の結果はFEM解析に対して、TEOS濃度が下流側で約5%低くなる、 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$ 濃度が全体的に約10%低い、 $\text{Si}_2(\text{OC}_2\text{H}_5)_6$ の出口付近における濃度変化が Si_3N_4 膜の SiCl_2 に比べて小さい、などの傾向を示す。これらは、 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$ 濃度に関する差が約10%と、少し大きい点を除けば、 Si_3N_4 膜と同等の結果である。また、(d)流れ方向の成膜速度分布は、NM解析とFEM解析の差は5%程度である。 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$ の濃度には約10%の差があるが、濃度が低いため成膜速度に対する影響は少ないからである。一方、(e)ウエハ面内の成膜速度分布から、NM解析、FEM解析いずれもウエハ中心に対して周辺の成膜速度が3~4%高くなっている。

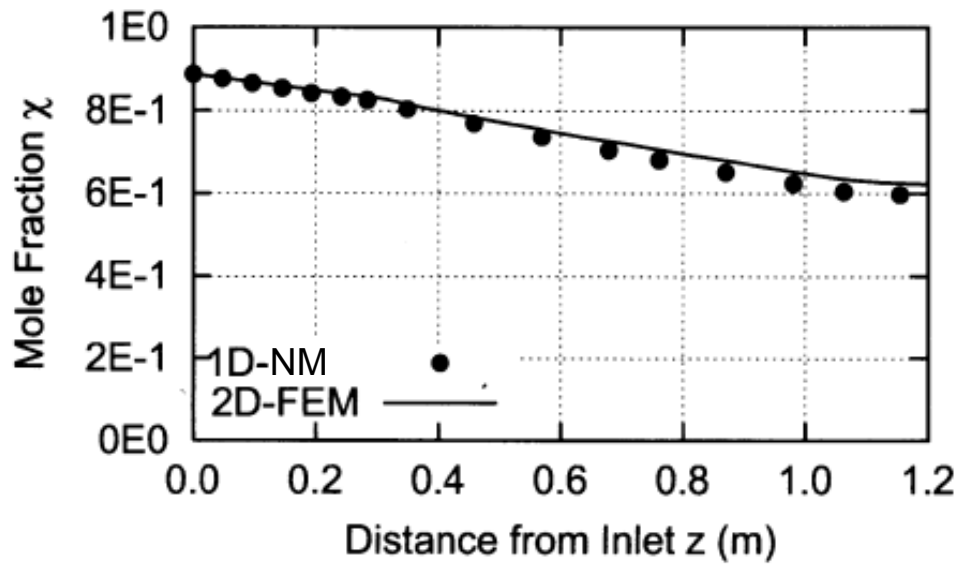


(a) Normalized mole fraction ψ of TEOS ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$).

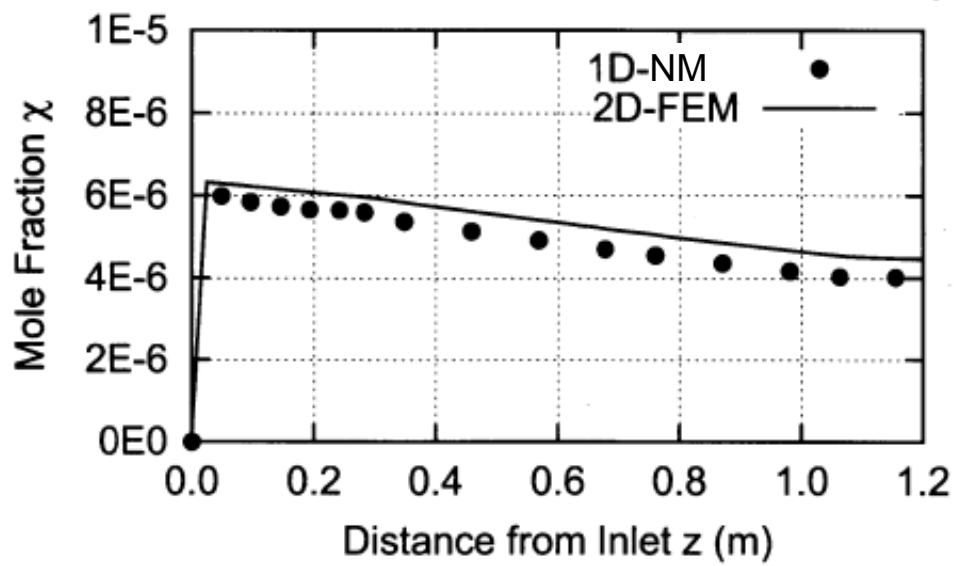


(b) Normalized mole fraction ψ of $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$.

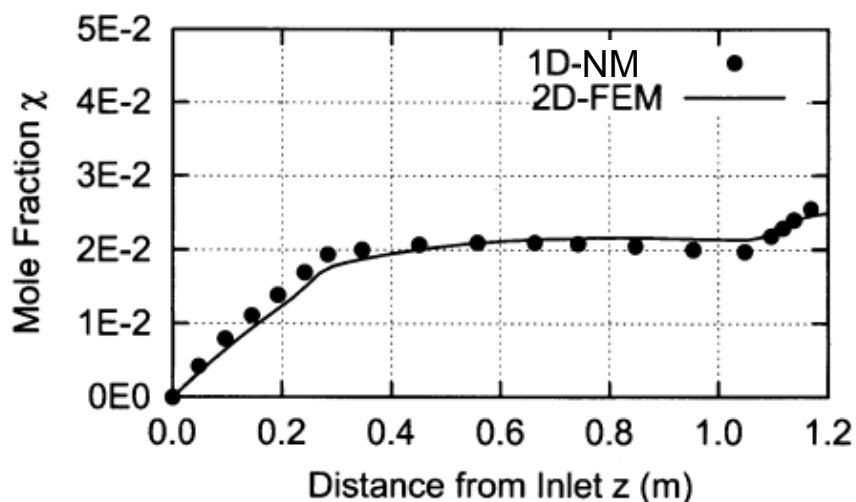
Fig. 4-6 Calculation result of TEOS-SiO₂.



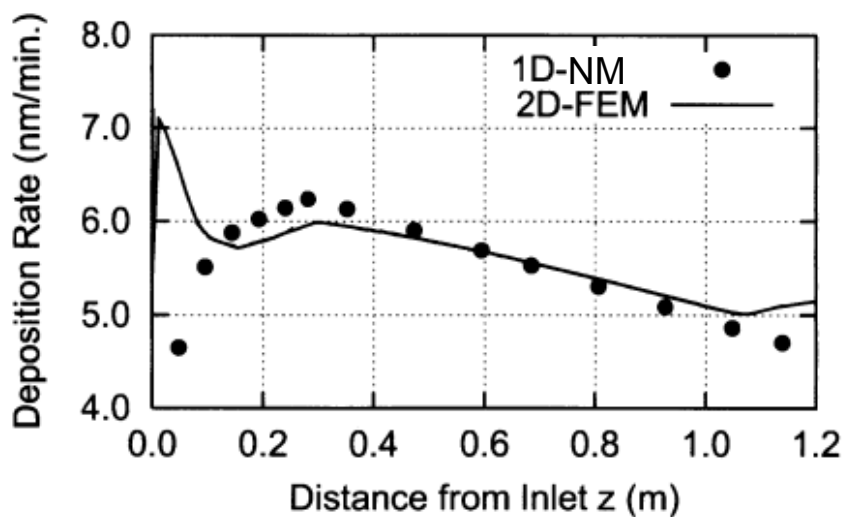
(a) Mole fraction distribution of TEOS along z direction.



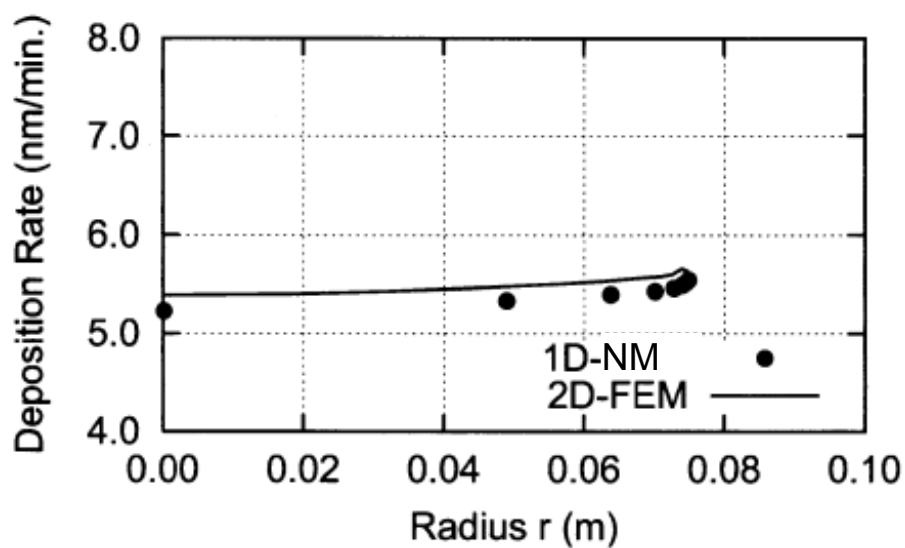
(b) Mole fraction distribution of $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{OH})_2$ along z direction.



(c) Mole fraction distribution of $\text{Si}_2(\text{OC}_2\text{H}_5)_6$ along z direction.



(d) Deposition rate distribution along z direction.



(e) Deposition rate distribution along r direction.

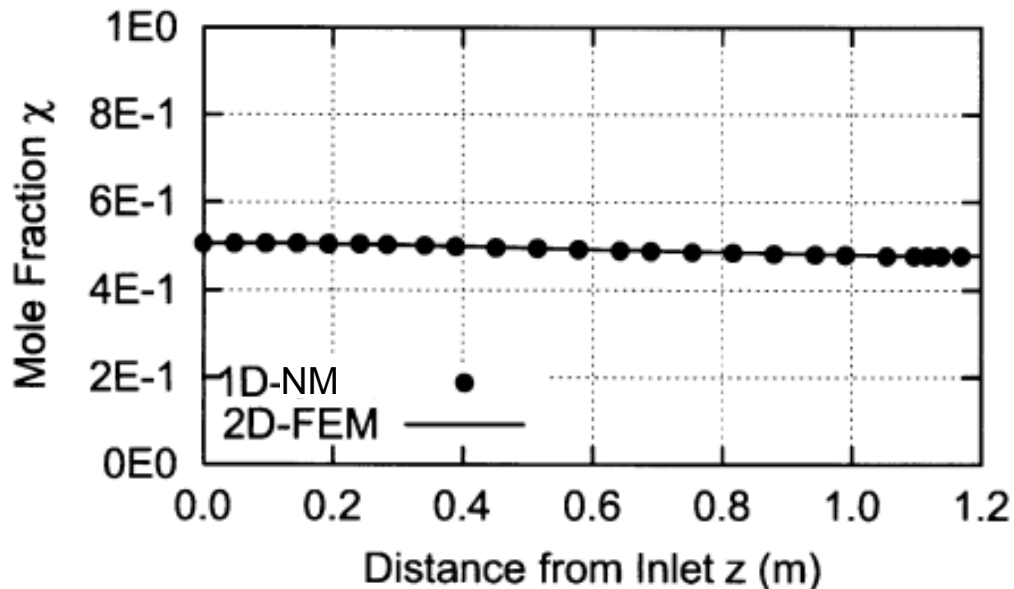
Fig. 4-7 Calculation result of TEOS film.

(c) Poly-Si膜

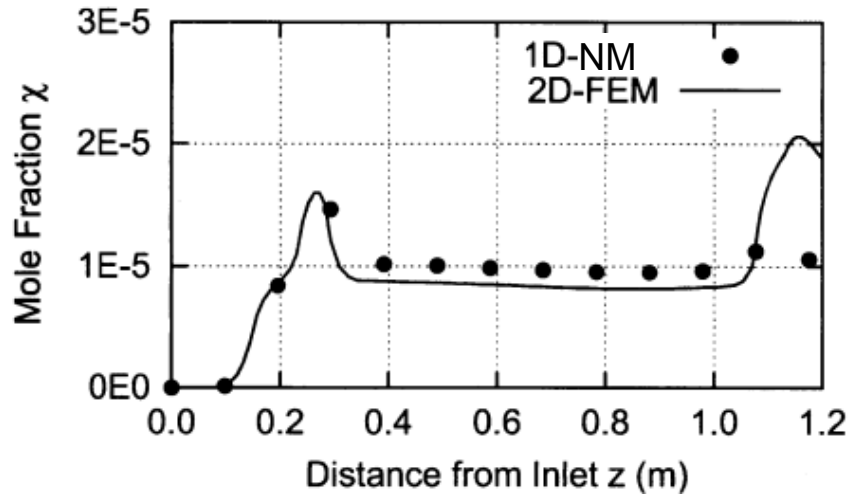
図4-8(a), (b)には SiH_4 と SiH_2 の流れ方向の濃度分布を, (c)には流れ方向のウェハ端の成膜速度分布を, (d)には, $z=0.648\text{m}$ でのウェハ面内の成膜速度分布を示した.

まず, (a), (b)のグラフでガスの濃度分布を比較して見ると, SiH_4 の濃度はNM解析とFEM解析の結果が良く一致していること(両者の差は1%程度), 流れ方向の濃度変化が少ないことがわかる. これに対して, SiH_2 の濃度は遮熱板とウェハ列の下端, ならびにウェハ列上端とアウターチューブの隙間で非常に高くなっている. これは Si_3N_4 膜の場合と同様に, これらの隙間では S/V 比が小さいため, 中間体の消費量が相対的に少なくなるからである. SiH_2 の濃度分布に関してNM解析とFEM解析を比較すれば, ウェハを入れた区間 ($z=0.295\sim 1.087\text{m}$) における両者の差は約15%であり (NM解析の方が低い値を示す), さらにウェハ列上端とアウターチューブの隙間では数10%の差になる (NM解析の方が高い値を示す). しかし, SiH_2 濃度の絶対値が低く成膜速度に対する寄与が小さいこと SiH_2 濃度が高い領域の影響がウェハ列の上下端近傍に局在化していることから, (c)流れ方向の成膜速度分布を見る限りNM解析とFEM解析の差は約5%に抑えられている.

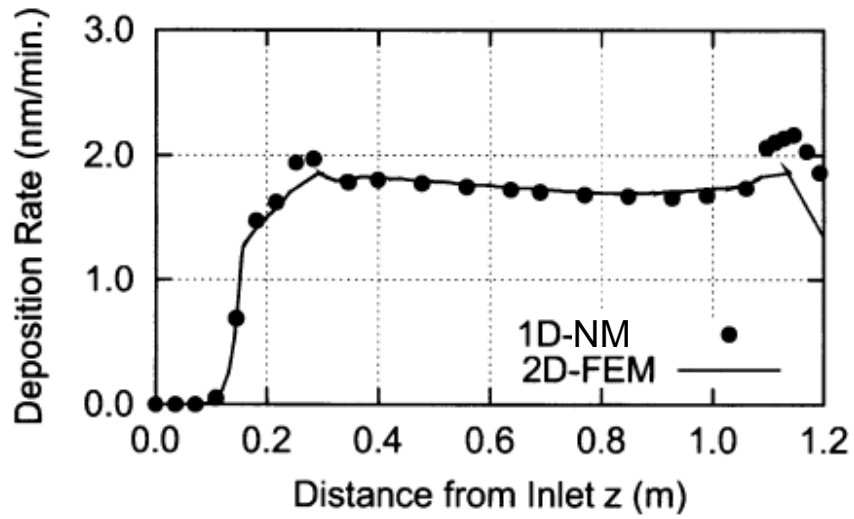
一方, (d)ウェハ面内の成膜速度を見ると, 付着確率が高い SiH_2 の影響によりウェハ周辺で急激に成膜速度が速くなっているが, 半径 r に対する成膜速度の変化はNM解析とFEM解析で良く一致している.



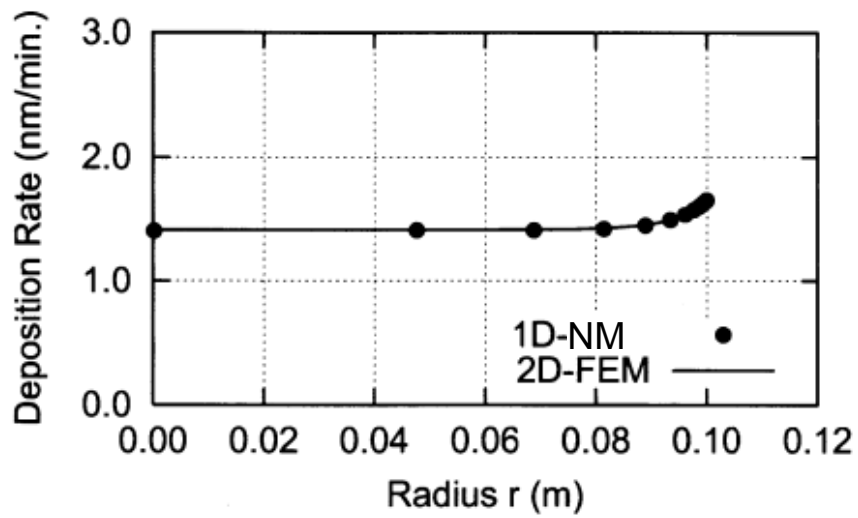
(a) Mole fraction distribution of SiH_4 along z direction.



(b) Mole fraction distribution of SiH_2 along z direction.



(c) Deposition rate distribution along z direction.



(d) Deposition rate distribution along r direction.

Fig. 4-8 Calculation result of Poly-Si film.

4.4 ネットワーク解析結果と二次元有限要素法解析結果の比較検討

Si₃N₄膜, TEOS-SiO₂膜, Poly-Si膜の三種類の解析を行い, 一次元NM解析で計算した成膜速度やそのバラッキが, 既存の二次元FEM解析の計算値と5~10%程度の差に収まることを確認した. ただし, 遮熱板-ウエハ間やウエハウタチューブ間などの隙間に近いところで, NM解析とFEM解析との差が大きくなることがわかった. また, NM解析はFEM解析の約1/1000~1/2000の時間で解析が可能であった. 以上よりネットワーク反応解析は計算誤差をあまり増やさずに計算時間を大幅に短縮できる優れた方法であると言える.

4.5 本章のまとめ

- (1) 縦型低圧CVDプロセスにおいて高速に解析できる成膜反応解析手法の開発を目的として, CVD装置の成膜速度分布を短時間で解析できる一次元ネットワーク反応解析モデルを新規に考案した. それは, 一次元移流拡散方程式を支配方程式として複数のガスの濃度分布を解いて, 成膜速度分布を計算し, 流れ方向の計算とウエハ面内の計算を別々のモジュールで解き, それぞれ濃度のやり取りを行うことで両者の連携を取り, 壁面への付着確率が高いガスに対して, 流路中心と壁面上のガスの濃度差を疑似的に考慮した計算するものである.
- (2) 一次元NM解析で計算した成膜速度やそのバラッキが, 既存の二次元FEM解析の計算値と5~10%程度の差に収まることを確認した. ただし, 遮熱板-ウエハ間やウエハウタチューブ間などの隙間に近いところで, NM解析とFEM解析との差が大きくなることがわかった.
- (3) NM解析はFEM解析の約1/1000~1/2000の時間で解析が可能であった. 以上よりネットワーク反応解析は計算誤差をあまり増やさずに計算時間を大幅に短縮できる優れた方法であると言える.

第5章 二枚葉低圧 CVD 装置による 均一成膜反応技術

5.1 背景

LSIの高集積化と低価格化を達成するため、半導体素子の微細化とウエハの大口径化にますます拍車がかかっている。段差被覆性に優れる低圧CVDはLSI製造に不可欠なプロセスであるが、このような背景からCVD装置には大口径ウエハへの均一成膜、有機物汚染低減、自然酸化膜の形成防止、処理時間短縮などがより一層厳しく要求されるようになってきた。これらの要求に答えるべく著者等が新たに開発した枚葉低圧CVD装置は、バッチ式の縦型低圧CVD装置と同じホットウォール方式を採用した点に特徴があり、これにより温度均一性に優れ、消費電力が少ないとの利点を有している。また、ウエハを二枚一括処理することにより高スループット化を図った点に特徴がある。

本章では、生産能力を増した枚葉低圧CVD装置の開発を目的として、二枚葉低圧CVD装置の開発及び温度均一性と Si_3N_4 膜の成膜速度（膜厚）均一性を実験で評価した結果を報告する。

5.2 二枚葉低圧CVD装置の構造

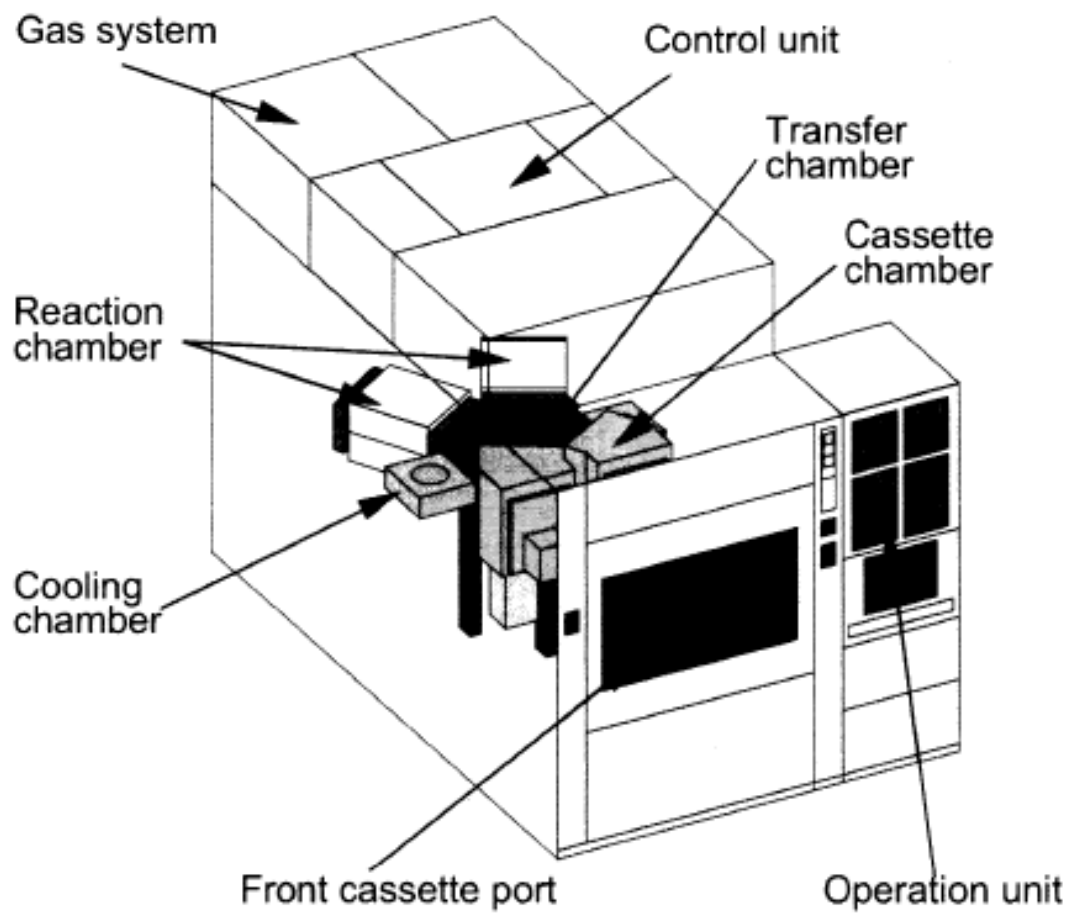
図5-1に開発した二枚葉低圧CVD装置の全体構成と外観写真を示す⁽⁴²⁾。ウエハ搬送ロボットを収納した六角形の搬送室の周囲に、カセット室二台、反応室二台、冷却室を一台を備えたマルチチャンバ構成とした。

図5-2に反応室の水平ならびに垂直断面を示す。石英反応管内に一定間隔をおいて二枚の支持板を設置し、その上にウエハを各々一枚ずつ載せ、二枚のウエハに一度に成膜することができる。上下に互いに平行に配置した平板ヒータからの熱放射により、反応管ごとウエハを加熱する。ウエハの温度均一性を向上させるため、ヒータを5ゾーンに分割し各ゾーンの発熱量を独立してPID制御する構造とした。ウエハはアルミナ製のアーム上に二枚を上下に重ねて保持し、一度に反応管内への挿入する。この時に生ずるウエハ前端と後端の温度上昇の差を低減するため、アームの水平移動速度を200mm/sと高速にし、反応管内に入る際のウエハ前端と後端の時間差を1秒以内とした。ヒータ分割数や各ゾーン寸法、挿入・取出条件、さらに後述するフィードフォワード制御条件は、第3章と同様の放射伝熱計算を行った結果をもとに決定した。

反応管の両端には、上部にガス導入口と下部に排気口を備えたフランジを取り付けた。一方のガス導入口から原料ガスを供給し、反応管内をウエハと平行に流した後、反対側の排気口から排気する。ガス導入口と排気口を左右切替えることにより、成膜中にガスの流れを反転させることができる（フリップフロップ方式）。

処理条件として1回の処理に要する時間（タクトタイム）を11分とし，ウエハ挿入ならびに取出に要する時間（ゲートバルブ開→ウエハ挿入，取出→ゲートバルブ閉までの時間）は30秒に統一した．処理済みのウエハを取出した後，再度新しいウエハの挿入を開始するまでの時間を1分とした．

Si₃N₄膜はSiH₂Cl₂とNH₃を用い，両者の流量比を1:20として成膜した．下流側のガス導入部に反応生成物が付着するのを防ぐため，成膜中は常に下流側のガス導入部からN₂を $1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{s}$ （100sccm）流した．

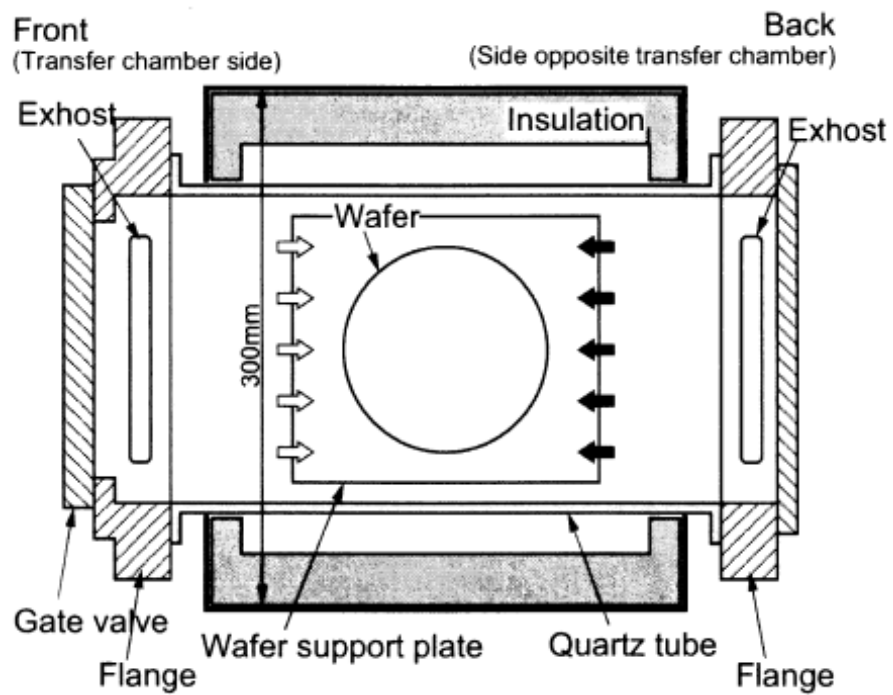


(a) Schematic view.

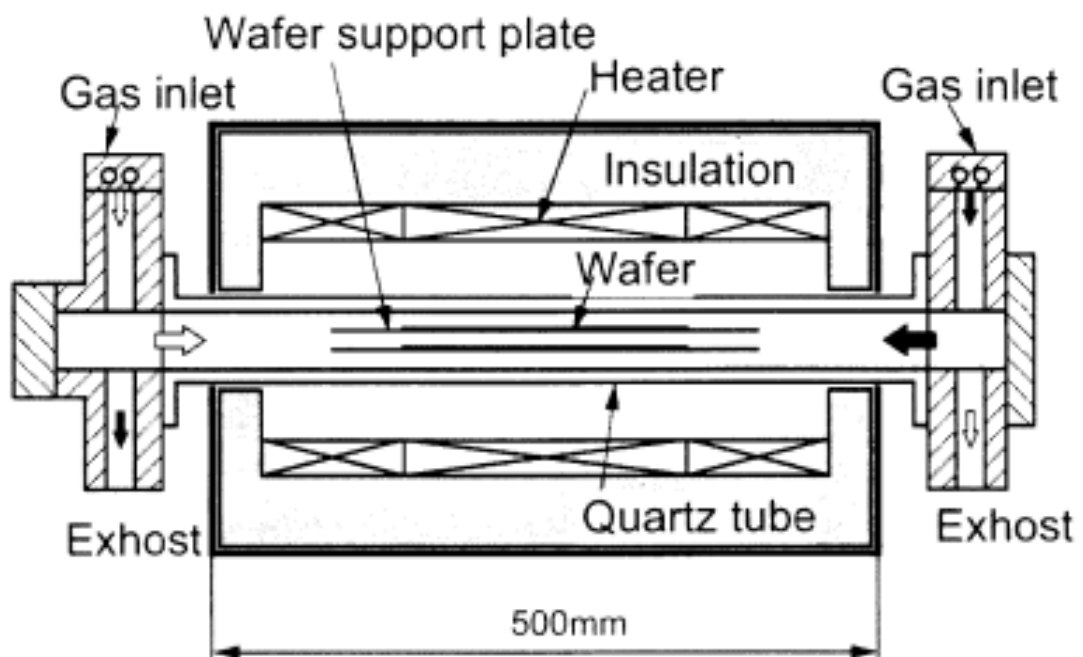


(b) Outside view.

Fig. 5-1 Hot-wall-type LPCVD equipment.



(a) Horizontal cross-section.



(b) Vertical cross-section.

Fig. 5-2 Reaction chamber of a hot-wall-type LPCVD equipment processing two wafers.

5.3 実験結果

5.3.1 温度均一性

(a) 定常状態の温度分布

図5-3は定常状態におけるウェハ温度分布を、セラミック接着剤で熱電対を固定したウェハを用いて測定した結果である．熱電対による温度測定精度は 0.5°C 程度である．反応管内部の圧力を 60Pa とし， N_2 を前側の導入口から $1.1\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ （ 630sccm ），後側の導入口から $1.7\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ （ 100sccm ）流し，後側の排気口から排気しながら測定を行った．上，下段ともウェハ面内の温度分布は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内に入るが，下段ウェハが上段に比較して平均で約 0.5°C 低いため，二枚のウェハ全体での温度ばらつきは $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内である．

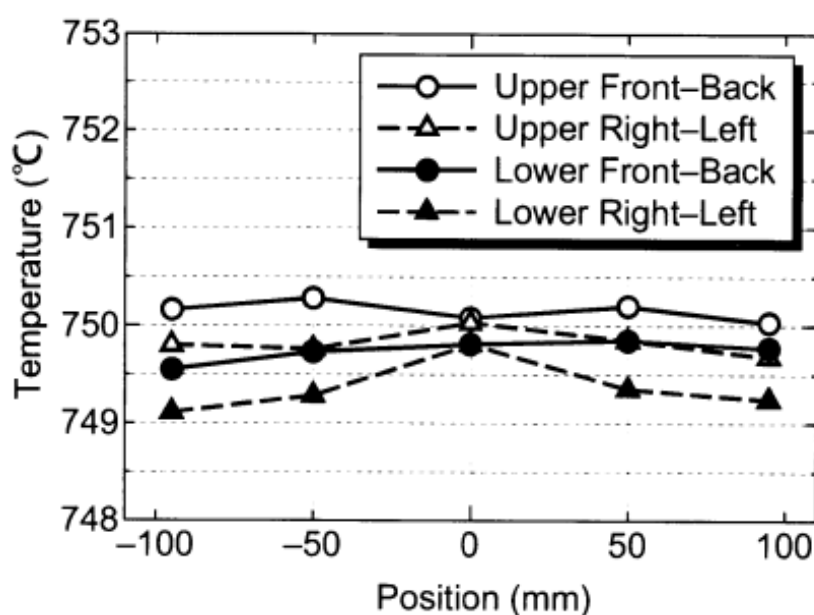


Fig. 5-3 Temperature distribution of wafers at steady state.

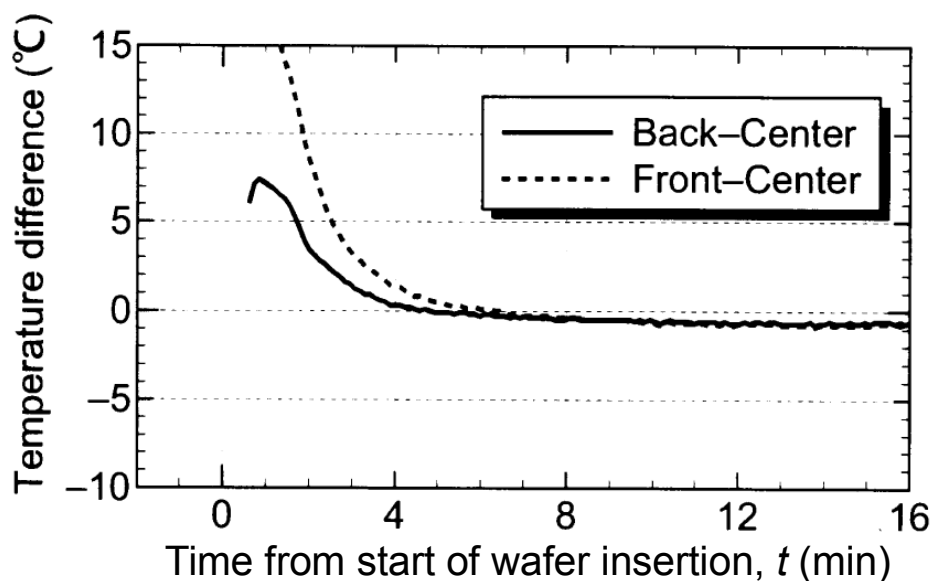
(b) ウェハ温度変化

図5-4にウェハを反応管内に挿入したときのウェハの温度変化を測定した結果を示す．反応管内の圧力を大気圧とし，ヒータ設定温度は定常状態でウェハの温度分布が $740\pm 100^{\circ}\text{C}$ 以内に入るように調整した後に測定した．グラフの横軸はウェハ挿入開始からの経過時間であり，挿入完了は30秒である．ウェハは1分後に約 700°C ，4分後に約 730°C に達し，以後の温度上昇は5分間の平均で約 $1.3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ である．ウェハ面内の温度分布について見れば，前側や後側よりも中心の温度上昇が遅くなるが，これはウェハ挿入によるCゾーンヒータの温度低下がF，Bゾーンに比べて大きいことが原因である．ただし，ウェハ面内の温度分布は上下ウェハとも4分以内に定常状態と同等の $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内に入る．さらに，二枚のウェハの中で最高温度と最低温度の差も，4分以降では約 $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 以内であり，定常状態の温度分布と同程度である．

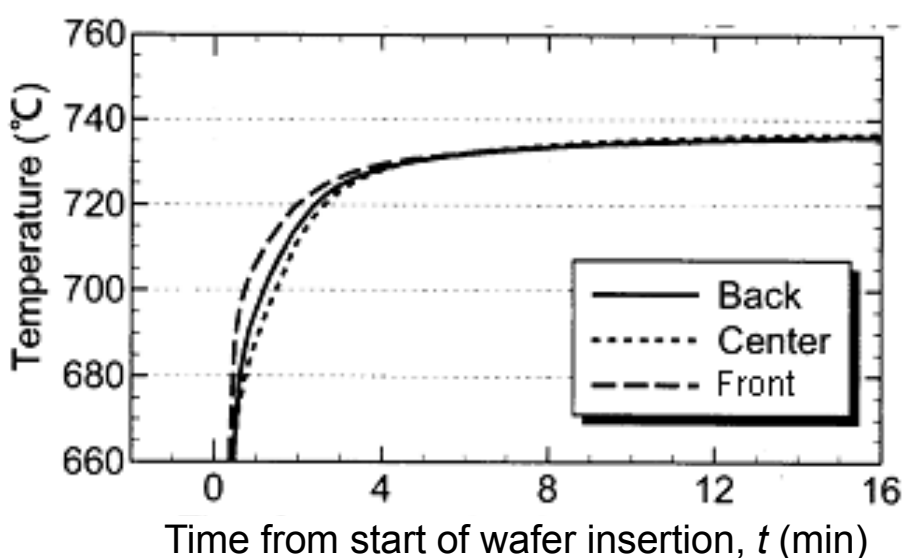
次に，できるだけ成膜中の温度変化を小さくするため，予め決めたパターンでヒ

ータ設定温度を変更するフィードフォワード制御 FFC (Feed-Forward Control) を適用した. 具体的には, ウエハの挿入開始前にCゾーンの設定温度を上げ (上げ幅 $\Delta T_s = 20^\circ\text{C}$), 成膜開始前に元に戻すというパターンを採用した.

図5-5はFFCの有無によるウエハの温度変化を比較した結果である. ウエハ面内の温度差が定常状態と同等の $\pm 1.0^\circ\text{C}$ に入るまでの時間がウエハ挿入開始後約4分から約3分にまで短縮されている. また, 成膜中 (4~9分) ウエハの温度変化は $\Delta T_c = 728.1^\circ\text{C} - 734.5^\circ\text{C} = 6.4^\circ\text{C}$ から, $\Delta T_c = 731.6^\circ\text{C} - 733.8^\circ\text{C} = 2.2^\circ\text{C}$ に低減されている.

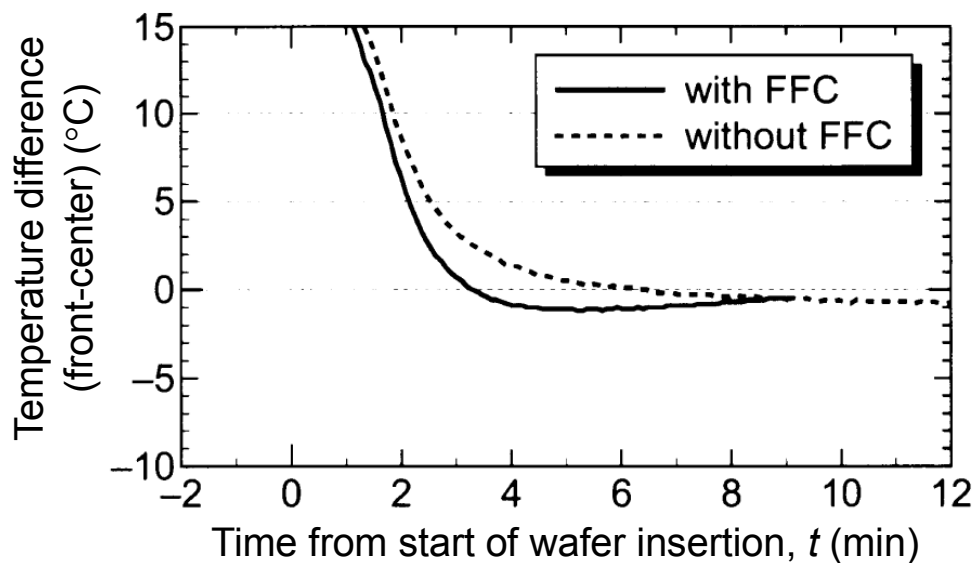


(a) Temperature difference.

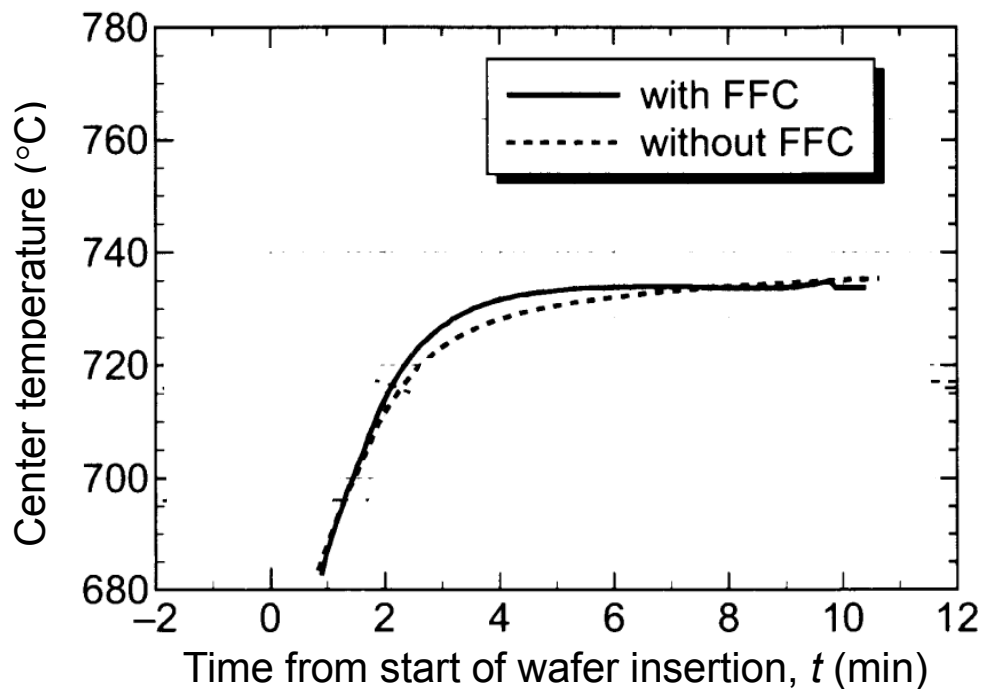


(b) Temperature change.

Fig. 5-4 Temperature change of wafers after insertion into reaction chamber without feed-forward control.



(a) Temperature difference.



(b) Temperature change.

Fig. 5-5 Temperature change of wafers after insertion with and without feed-forward control.

(c) 連続処理時の温度再現性

図5-6にウエハを連続して処理したときの処理回数と成膜開始ならびに終了時点のウエハ中心温度の関係を示す. 処理回数が増えるにしたがってウエハ温度は低下し, 特に1回目から3回目までの低下が大きい. 温度低下は挿入開始4分後の成膜開

始時で約2.2℃，挿入開始9分後の成膜終了時で約1.4℃である．

図5-6はFFCのCゾーン設定温度の変化量 ΔT_s を処理回数毎に次式で計算される値に変更したとき（連続処理制御）の温度低下を示す結果である．

$$\Delta T_s(n) = \Delta T_s(1) + \{T_m(n) - T_m(1)\} \quad (5-1)$$

ここで， $\Delta T_s(i)$ ： i バッチ目のCゾーン設定温度の変化量， $T_m(i)$ ： i バッチ目開始時点での炉内温度である．炉内温度とは加熱炉の側面から反応管の直下に挿入した熱電対の温度である．温度低下は，連続処理制御無しの場合の1/2～1/3に相当する成膜開始時点で0.7℃終了時点で0.8℃に低減されている．

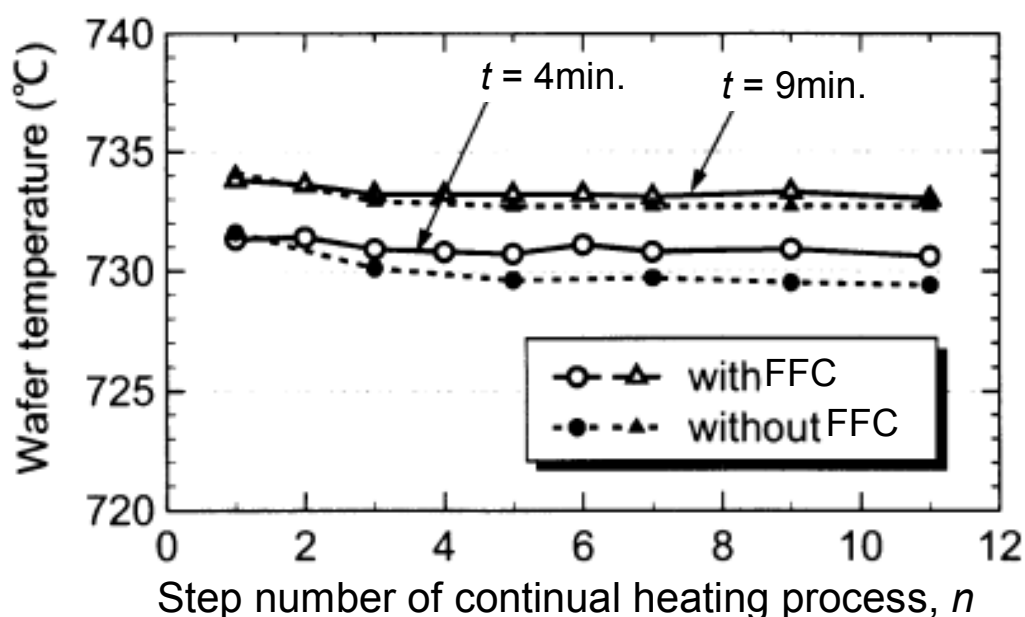


Fig. 5-6 Change of wafer temperature during continual heating process.

5.3.2 成膜速度均一性

(a) ウエハ面内の成膜速度分布

図5-7に，ウエハを反応室に挿入して 25分後から5分間成膜を行ったときの，ウエハ面内のガス流れに沿った前後方向の成膜速度分布を示す．ウエハ温度は定常に達しており，成膜温度740℃では図5-3の分布である．成膜圧力は60Paで一定とし，原料ガスの流量を変えることによって流速を0.9～7.2m/sの範囲で変化させた．また，図5-7にガス流速と平均成膜速度ならびに成膜速度ばらつきの関係を，ウエハ挿入から4 分後から5分間成膜をした実験結果と比較して示した．

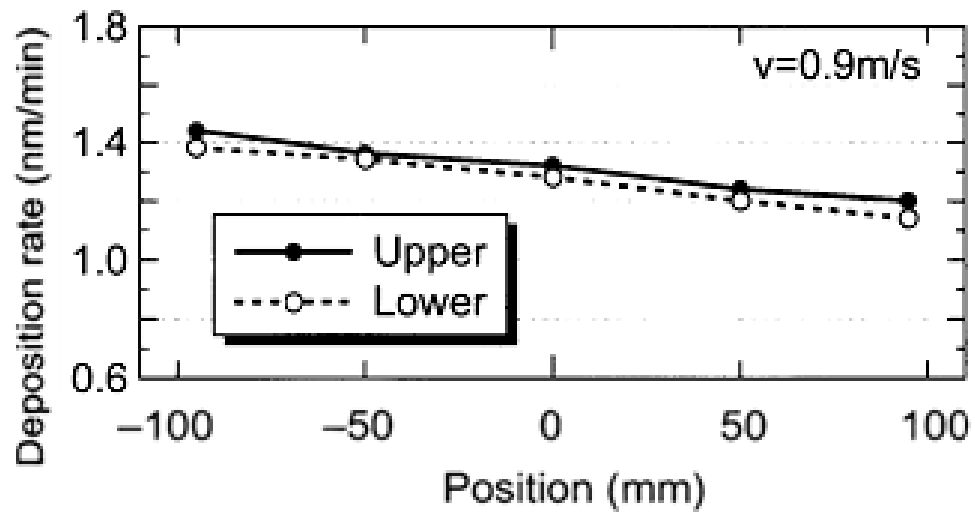
ガス流速が約2.0m/sの時にウエハ面内の成膜速度分布が最小になり，それより流速が遅い場合には上流側の成膜速度が，逆に流速が速い場合には下流側の成膜速度が速くなる．また，ウエハ面内の成膜速度分布が最小になる流速で成膜速度が最大

になることがわかる。

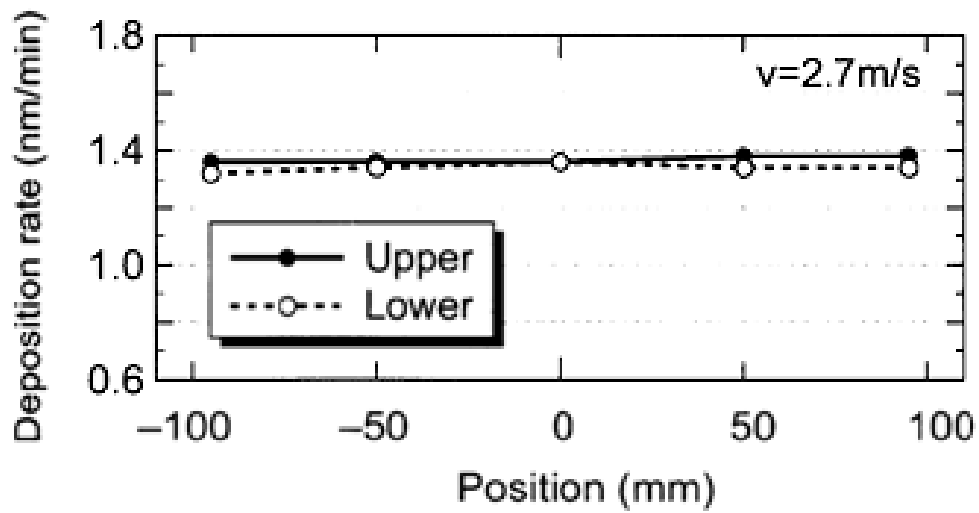
SiH_2Cl_2 と NH_3 から Si_3N_4 膜を成膜するプロセスは、Morosanuらによって温度、圧力、ガス流量等の成膜条件と成膜速度の関係が実験により詳細に検討され⁽³⁷⁾⁻⁽³⁹⁾、中間体 SiCl_2 が関与した気相および表面での反応が関与することが報告されている⁽⁴⁰⁾。図5-7にて流速が速い場合には下流側で成膜速度が速くなることから、Morosanuら⁽³⁷⁾⁻⁽⁴⁰⁾が示したように反応過程が気相中で原料ガスが分解してできる中間体 SiCl_2 が成膜に寄与していることが確認された。

上下のウェハの成膜速度を比較すると、下段ウェハの成膜速度が上段より2～3%遅くなっている。上下の温度がほぼ一致するウェハ中心でも下段の成膜速度が遅いことから、この差は上下のウェハの温度差に起因するものではない。実験装置をチェックしたところ、上段はウェハ上部の隙間が12mm であるのに対して、下段は11.5mmになっており、これが下段ウェハの成膜速度が遅い原因となっている可能性がある。

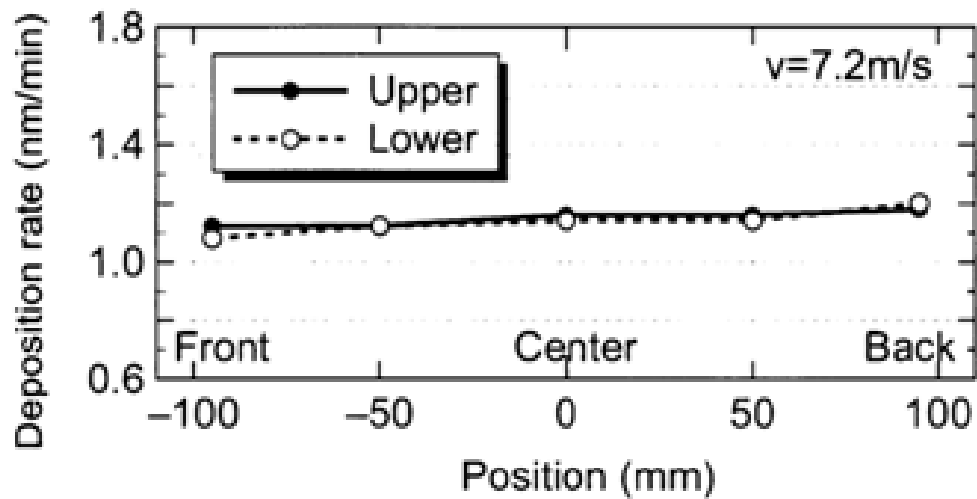
成膜中のウェハ温度、731.6～733.8℃（図5-5のFFC有りの場合）と定常状態より8～10℃低くなっている。ウェハ温度が732.7℃（731.6～733.8℃の平均）で一定で、定常状態で成膜を行った実験結果（図 5-7）と比較して、面内の成膜速度分布が均一になるガス流速が1.26m/sあるいは1.62m/sに下がり、定常状態の成膜では上流側の成膜速度が速くなる流速においても下流側の成膜速度が速くなっている。これは、成膜温度が低いため原料ガスの分解が遅くなり、同じガス流速でも中間体濃度が最大になる位置が下流側に移動するからである。定常状態での成膜に比較して全体的に成膜速度が下がるが、最大値は逆に大きくなっている。また、ウェハ面内の成膜速度ばらつきは、特にガス流速が速い範囲で定常状態の成膜に比べて大きく、その最小値も定常状態の±2.2%から±3.3%へと大きくなっている。



(a) Gas velocity $v=0.9\text{m/s}$.

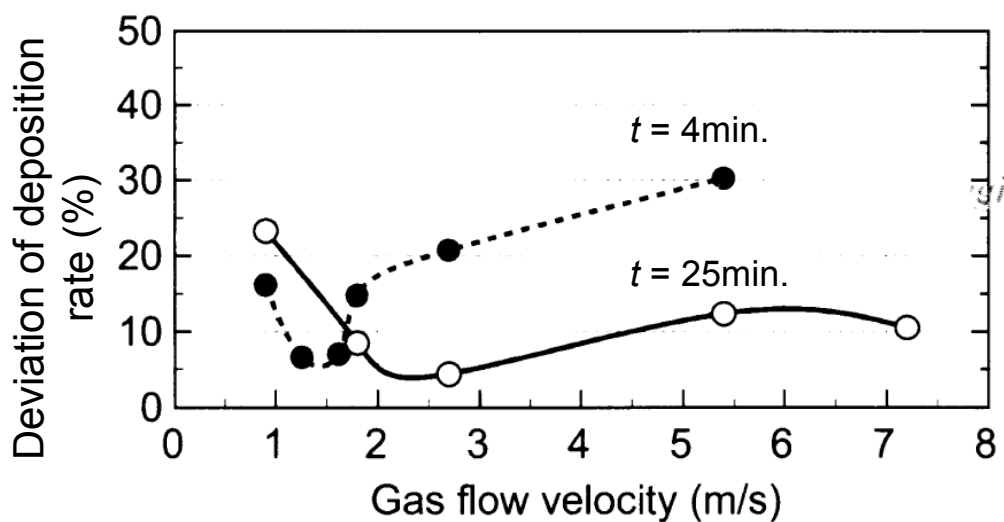


(b) Gas velocity $v=2.7\text{m/s}$.

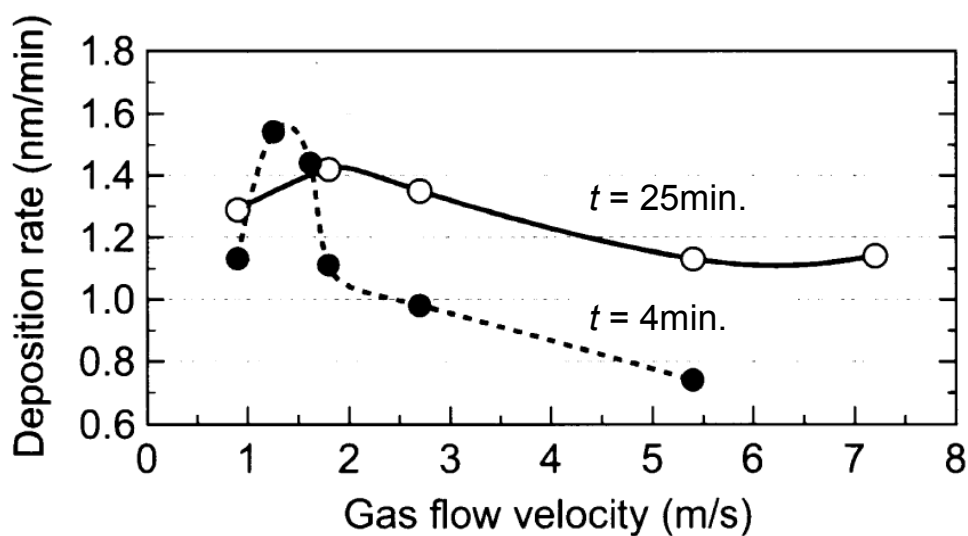


(c) Gas velocity $v=7.2\text{m/s}$.

Fig. 5-7 Deposition rate.



(a) Deviation of deposition rate.



(b) Deposition rate.

Fig. 5-8 Relation between deposition rate and gas flow velocity.

(b) ガス流の切替えによる成膜速度均一化

図5-9にフリップフロップガス供給によるウエハ面内の成膜速度分布の均一化の効果を示す。(a)はフリップフロップガス供給無しの、(b)はフリップフロップガス供給有りの結果である。ガスを流す方向はフリップフロップガス供給無しでは前→後方向、フリップフロップガス供給有りでは前半2.5分は前→後方向、後半2.5分は後→前方向とした。ガス流速はウエハ面内の成膜速度分布が比較的大きくなる0.9m/sとし、その他の条件は定常状態で成膜した場合と同一にして、ウエハ挿入25分後から5分間成膜を行った。

フリップフロップガス供給無しの場合、ウエハ面内の成膜速度ばらつきが約 $\pm 9\%$ であるのに対して、フリップフロップガス供給有りの場合の面内ばらつきは約 $\pm 1.3\%$ と1/7になる。先に述べたように、フリップフロップガス供給を用いないで

もガス流速を最適化することによって、ウエハ面内 $\pm 2\%$ ，上下ウエハ間 $\pm 2\%$ の成膜速度均一性がほぼ達成できるが，フリップフロップガス供給を用いればさらに少ない原料ガス量で目標の均一性が得られる。

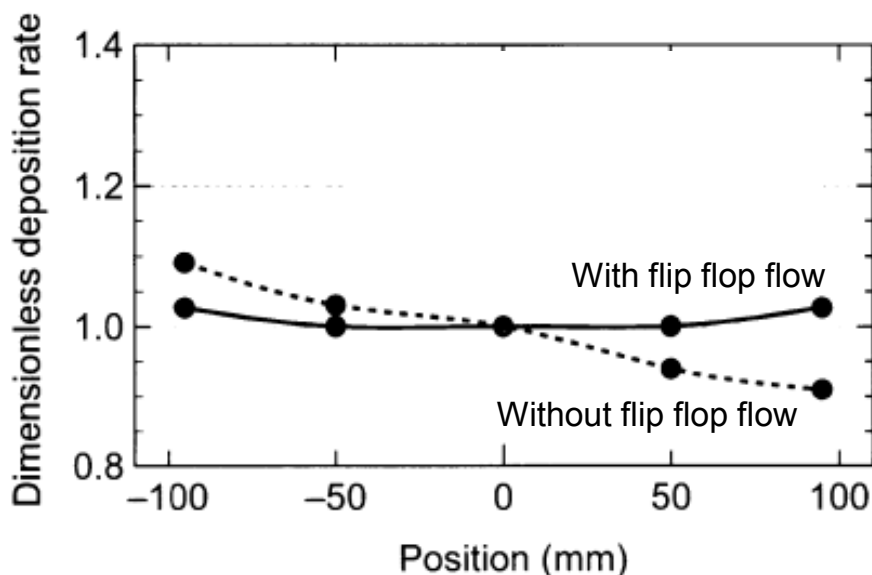


Fig. 5-9 Effect of flip-flop flow on deposition rate.

(c) 連続処理時のウエハ間の成膜速度均一性

図5-10に11分のタクトタイムで連続処理を行った場合の，処理回数に対する成膜速度の変化を示す．(a)は連続処理制御無し，(b)は連続処理制御有りの場合の実験結果である，成膜速度は上下およびウエハ面内の平均をとり，さらに1回目の成膜速度を基準にして無次元化した．成膜条件は，ウエハ温度 750°C ，圧力 96Pa ，ガス流速 0.9m/s (ガス流量 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2=1.3\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{s}$ (8sccm)， $\text{NH}_3=2.7\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ (160sccm))，フリップフロップ無しで，ウエハ挿入4分後から3分間成膜を行った．連続処理制御無しの場合には，処理が進むにつれて反応室内の温度が下がるため，1回目から6回目まで Si_3N_4 の成膜速度が徐々に低下している．反応室内の温度の低下は約 5°C であり，成膜速度の低下に換算すると約10%になる．しかし，実際の成膜速度の低下は約6%でこの値より小さく，成膜中のウエハの平均温度の低下は約 3°C と推定される．(b)の連続処理制御有りの場合には，反応室内温度の低下幅が約 1.5°C に低減されており，成膜速度は1～3回目まではほぼ一定で，4回目以降は反対に約2% 高くなっている，反応室内温度と成膜速度の変化が完全に対応しないのは，成膜開始時の反応室内の温度と成膜中のウエハ平均温度が一致しないため考えられる．しかしながら，この結果から連続処理制御によってウエハ間の成膜速度ばらつきを低減し，目標のウエハ間の成膜速度均一性 $\pm 2\%$ を達成できることを確認できた．

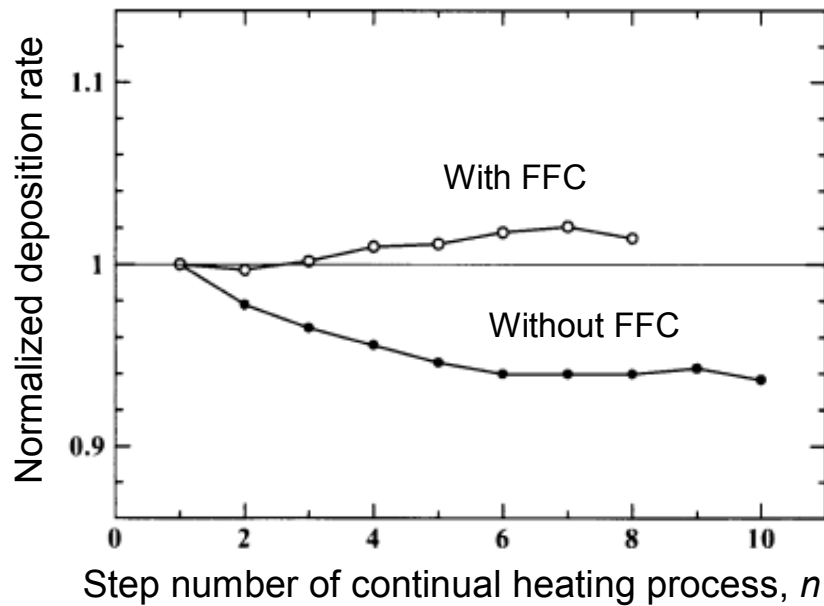


Fig. 5-10 Change of deposition rate during continual deposition process.

5.4 本章のまとめ

- (1) 生産能力を増した枚葉低圧 CVD 装置の開発を目的として、二枚葉低圧 CVD 装置を開発した。
- (2) 二枚葉低圧 CVD 装置の温度均一性と Si_3N_4 膜の成膜速度（膜厚）均一性を実験で評価し、定常状態における二枚のウエハ全体での温度ばらつきは $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内であることを明らかにした。
- (3) フィードフォワード制御（FFC）で連続処理制御無しの場合の $1/2 \sim 1/3$ に相当する成膜開始時点で 0.7°C 終了時点で 0.8°C に低減できる。
- (4) フリップフロップガス供給無しの場合、ウエハ面内の成膜速度ばらつきが約 $\pm 9\%$ であるのに対して、フリップフロップガス供給有りの場合の面内ばらつきは約 $\pm 1.3\%$ と $1/7$ になる。
- (5) フリップフロップガス供給技術で、目標のウエハ間の成膜速度均一性 $\pm 2\%$ を達成できる。

第6章 結論

半導体酸化拡散・化学気相成長装置の高精度熱処理・成膜反応プロセスに関して、第2章ではシリコンウエハに非接触で精度良くウエハ温度を測定する手法の検討、第3章では縦型拡散装置の高速解析手法の検討、第4章では縦型低圧CVD装置での成膜反応プロセスの高速解析手法の検討、第5章では二枚葉低圧CVD装置の検討を行い、以下の結論を得た。

第2章のバッチ拡散装置の放射温度計測手法について

- (1) 熱処理プロセスにおいてシリコンウエハに接触せずに精度良くウエハ温度を測定する手法の開発を目的として、横型拡散装置を対象に2個の石英プリズムからなる光ガイドを用いて熱放射の光路を曲げ、直接放射温度計の視野内にとらえられない隠れた位置にあるシリコンウエハの放射測温を行う方法を開発した。
- (2) 開発した放射測温法では光ガイドとウエハでの迷光による測定誤差は定常状態では約0.5℃以下、ウエハの挿入・取出に伴ってウエハ温度が炉内壁温度より250℃低い状態で10～20℃、150℃低い状態で約5℃である。
- (3) 炉内への挿入・取出を含む60分間のウエハ温度を測定した結果、定常状態では熱電対の測定値を基準とすると、本測定による放射温度計の測定値は±2℃以内の差でこれと一致した。

第3章の縦型拡散装置の高速解析手法の検討について

- (1) 本章では、縦型拡散装置において高速に解析できるウエハ温度分布解析手法の開発を目的として、縦型拡散装置において、ヒータ発熱量制御、ウエハ熱処理条件を与えたときに、ウエハ温度分布の時間変化を計算するプログラムを開発した。
- (2) ヒータ発熱量にフィードフォワード制御（挿入時に挿入口近傍のヒータ設定温度を高くする）を用いると、全ウエハの温度上昇速度を速くすることができる。
- (3) 縦型拡散装置では挿入時より取出時に熱応力欠陥が発生する可能性が大きい。取出時のウエハ面内温度差に及ぼすウエハ直径、厚さ、間隔、取出速度の影響について無次元図表を作成した。

第4章の縦型低圧CVD装置での成膜反応プロセスの高速解析手法について

- (1) 縦型低圧CVDプロセスにおいて高速に解析できる成膜反応解析手法の開発を目的として、CVD装置の成膜速度分布を短時間で解析できる一次元ネットワーク反応解析モデルを新規に考案した。それは、一次元移流拡散方程式を支配方程式として複数のガスの濃度分布を解いて、成膜速度分布を計算し、流れ方向の計算とウエハ面内の計算を別々のモジュールで解き、それぞれ濃度のやり取りを行うことで両者の連携を取り、壁面への付着確率が高いガスに対して、流路中心と壁面上のガスの濃度差を疑似的に考慮した計算するものである。
- (2) 一次元NM解析で計算した成膜速度やそのばらつきが、既存の二次元FEM解析の

計算値と5～10%程度の差に収まることを確認した。ただし、遮熱板-ウェハ間やウェハウタチューブ間などの隙間に近いところで、NM解析とFEM解析との差が大きくなることがわかった。

- (3) NM解析はFEM解析の約1/1000～1/2000の時間で解析が可能であった。以上よりネットワーク反応解析は計算誤差をあまり増やさずに計算時間を大幅に短縮できる優れた方法であると言える。

第5章の二枚葉低圧 CVD 装置の検討について

- (1) 生産能力を増した枚葉低圧 CVD 装置の開発を目的として、二枚葉低圧 CVD 装置の開発した。
- (2) 二枚葉低圧 CVD 装置の温度均一性と Si_3N_4 膜の成膜速度（膜厚）均一性を実験で評価し、定常状態における二枚のウェハ全体での温度ばらつきは $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内である。
- (3) フィードフォワード制御（FFC）で連続処理制御無しの場合の 1/2～1/3 に相当する成膜開始時点で 0.7°C 終了時点で 0.8°C に低減できる。
- (4) フリップフロップガス供給無しの場合、ウェハ面内の成膜速度ばらつきが約 $\pm 9\%$ であるのに対して、フリップフロップガス供給有りの場合の面内ばらつきは約 $\pm 1.3\%$ と 1/7 になる。
- (5) フリップフロップガス供給技術で、目標のウェハ間の成膜速度均一性 $\pm 2\%$ を達成できる。

以上に述べたように本研究により、熱処理プロセスにおいてシリコンウェハに接触せずに精度良くウェハ温度を測定する手法を開発し、縦型拡散装置において高速に解析できるウェハ温度分布解析手法を開発し、縦型低圧 CVD プロセスにおいて高速に解析できる成膜反応解析手法を開発し、生産能力を増した枚葉低圧 CVD 装置を開発し、学術的に基礎技術を体系化し、産業界の発展に大いに貢献した。

参考文献

- (1) International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS, 国際半導体技術ロードマップ), <日本語版 : <http://semicon.jeita.or.jp/STRJ/>>.
- (2) Hu, S. M., Temperature Distribution and Stresses in Circular Wafers in a Row During Radiative Cooling, *Journal of Applied Physics*, Vol. 40, No. 11 (1969), pp. 4413-4423.
- (3) 空屋錦司, 松葉育雄, 青島孝明, 半導体酸化・拡散装置における過渡的なウエハ面内温度分布解析, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J70-C, No. 3 (1987), pp. 324-331.
- (4) 小田嘉則, 岡本茂, 黒田敬司, 炉内ウエハ温度 熱応力解析シミュレータ F A I R Y, 第49回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 秋季, Vol. 2 (1988), p. 611.
- (5) Shimizu, H., Aoshima, T., Thermal Warpage of Large Czochralski-Grown Silicon Wafers, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 27, No. 12 (1988), pp. 2315-2323.
- (6) Schravendijk, B. J. V., Koning, W. L. D., Modeling and Control of the Wafer Temperature In a Diffusion Furnace, *Journal of Applied Physics*, Vol. 61, No. 4 (1987), pp. 1620-1627.
- (7) Roenigk, K.F., Jensen, K.F., Low Pressure CVD of Silicon Nitride, *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 134, No. 7 (1987), pp. 1777-1785.
- (8) 反田徹史, CVD 法による誘電体薄膜堆積のモデル化, 東京大学工学部博士論文 (1995), pp. 135-136.
- (9) 霜垣, 他 5 名, シランのケミストリー(SiH_4 , $\text{SiH}_6/\text{C}_2\text{H}_2$), 化学工学会 CVD 工学基礎プロジェクト研究会初年度報告書 (1991), pp. 95-114.
- (10) Lin, K.K., Spanos, C.J., Statistical Equipment Modeling for VLSI Manufacturing: Application for LPCVD, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 3, No. 4 (1990), pp. 216-229.
- (11) Sachs, E., Prueger, G.H., Guerrieri, R., An Equipment Model for Polysilicon LPCVD, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 5, No. 1 (1992), pp. 3-13.
- (12) Guo, R.S., Sachs, E., Modeling, Optimization and Control of Spatial Uniformity in Manufacturing Processes, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 6, No. 1 (1993), pp. 41-57.
- (13) Carlen, E.T., Mastrangelo, C.H., Statistical Model for Spatial Correlation in Thin Film Deposition and Reactive Growth, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 11, No. 3 (1998), pp. 511-521.

- (14) Gumphier, J., Bather, W.A., Wedel, D., LPCVD Silicon Nitride Uniformity Improvement Using Adaptive Real-Time Temperature Control, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 16, No. 1 (2003), pp. 26-35.
- (15) Morosanu, C.E., Iosif, D., Mechanism of Si_3N_4 Films Prepared from SiH_2Cl_2 and NH_3 under Kinetically Controlled Conditions, Thin Solid Films, Vol. 92 (1982), pp. 333-340.
- (16) DePinto, G., A methodology for Optimizing a Constant Temperature Polysilicon Deposition Process, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 6, No. 4 (1993), pp. 332-342.
- (17) Theodoropoulou, A., Adomaitis, R.A., Zafiriou, E. Model Reduction for Optimization of Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition Systems, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 11, No. 1 (1998), pp. 85-98.
- (18) He, Q., Qin, S.J., Toprac, A.J., Computationally efficient Modeling of Wafer Temperature in a Low-Pressure Chemical vapor deposition Furnace, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 16, No. 2 (2003), pp. 342-350.
- (19) 服部晋, 佐久間史洋, 狭波長帯域放射温度計の特性表示式, 計測自動制御学会論文集, Vol. 18, No. 7 (1982), pp. 704-709.
- (20) 平澤茂樹, 渡辺智司, 鳥居卓爾, 内野敏幸, 土井隆明, 酸化膜, 窒化膜付シリコンウエハの950℃における放射熱物性, 日本機械学会論文集, Ser. B, Vol. 55, No. 516 (1989), pp. 2404-2410.
- (21) Sato, T., Spectral Emissivity of Silicon, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 6, No. 3 (1967), pp. 339-347.
- (22) Palik, E.D., Handbook of Optical Constants of Solid, Academic Press (1985), pp. 547-569, 749-763, 771-774.
- (23) 藤原史郎, 光学薄膜, 共立出版 (1986), pp. 12-18.
- (24) Bom, M., Wolf, E., (草川, 識田訳), 光学の原理 I, 東海大学出版会 (1974), pp. 59-64.
- (25) 渡辺智司, 平澤茂樹, 小松利広, 内野敏幸, 半導体熱処理装置, 公開特許公報, 平 2-39525.
- (26) 尾崎康孝, 井上実, 上川春穂, S i ウエハの放射率自動補正温度測定, 第 50 回秋季応用物理学会講演予稿集, Vol. 1, 30a-X-1 (1989), p. 43.
- (27) 渡辺智司, 平澤茂樹, プラズマ中の基板温度の測定装置, 公開特許公報, 平 4-56145.
- (28) 平澤茂樹, 渡辺智司, 本間満, 高垣哲也, 半導体熱処理装置, 公開特許公報, 平 4-48724.
- (29) 平澤茂樹, 渡辺智司, 鳥居卓爾, 高垣哲也, 打越幸男, 内野敏幸, 新形ホットウォールタイプ枚葉拡散装置による半導体ウエハの熱処理実験, 日本機械

- 学会論文集, Ser. B, Vol. 57, No. 544 (1991), pp. 4254-4259.
- (30) 飛岡正明, 池ヶ谷明彦, プラズマ中の基材表面温度測定法, 公開特許公報, 昭 63-24133.
 - (31) 安江淳, 8 インチ対応赤外線ランプアニール装置「LAW-815-A」, 電子材料 (1991-3), pp. 43-46.
 - (32) 渡辺智司, 鳥居卓爾, 平澤茂樹, 高垣哲也, 半導体熱処理装置, 公開特許公報, 平 2-303024.
 - (33) 渡辺智司, 平澤茂樹, 内野敏幸, 半導体製造における放射温度計測の放射率自動補正方法とノイズ低減方法, Thermal Science & Engineering, Vol. 1, No. 2 (1993), pp. 1-5.
 - (34) 平澤茂樹, 鳥居卓爾, 高垣哲也, 半導体拡散プロセスにおける挿入時の積層ウエハの温度分布, 日本機械学会論文集, Ser. B, Vol. 55, No. 517 (1989), pp. 2880-2885.
 - (35) Howell, J. R., Radiation Configuration Factors, McGraw-Hill Book Co. (1982), p. 132.
 - (36) Radmehr, A., Kelkar, K.M., Kelly, P., Patankar, S.V., Kang, S.S., Analysis of the Effect of Bypass on the Performance of Heat Sinks using Flow Network Modeling (FNM), Proceedings of 15th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (1999), pp. 42-47.
 - (37) SINDA/FLUINT, Cullimore & Ring Technologies, Inc., (2010),
<<http://www.crtech.com/sinda.html> (参照日 2013 年 8 月 1 日)>.
 - (38) Morosanu, C.E., Segal, E., Kinetics of Heterogeneous Deposition of Silicon, Silicon Nitride and Silicon Dioxide Film from Dichlorosilane, Revue Roumaine de Chimie, Vol. 24 (1979), pp. 1423-1430.
 - (39) Morosanu, C.E., Segal, E., Deposition Kinetics of Si_3N_4 Film by Radiofrequency Glow Discharge and Low Pressure CVD Methods, Revue Roumaine de Chimie, Vol. 25 (1980), pp. 315-322.
 - (40) Morosanu, C.E., Segal, E., A Comparison of Kinetic Parameters for Various CVD Si_3N_4 Films, Materials Chemistry, Vol. 7 (1982), pp. 79-87.
 - (41) Morosanu, C.E., Iosif, D., Mechanism of Si_3N_4 Films Prepared from SiH_2Cl_2 and NH_3 under Kinetically Controlled Conditions, Thin Solid Films, Vol. 92 (1982), pp. 333-340.
 - (42) 国井泰夫, 中嶋定夫, 宮博信, 柳川秀宏, 三瀬 信行, 低コスト・高性能の半導体デバイス製造に貢献する成膜・アニール用縦型装置, 日立評論, Vol. 93, No. 2 (2011), pp. 174-175.
 - (43) 池田文秀, 内野敏幸, 渡辺智司, 高スループットを実現した枚葉式熱処理装置, 日立評論, Vol. 76, No. 7 (1994), pp. 535-538.

論文目録

第2章は次の論文からなる

学術雑誌

J1 渡辺智司, 鳥居卓爾, 平澤茂樹, 高垣哲也

放射温度計による半導体熱処理装置内のウエハ温度計測
計測自動制御学会論文集, Vol. 25, No. 9, pp. 925-931, 1989.

J2 平澤茂樹, 渡辺智司, 鳥居卓爾, 内野敏幸, 土井隆明

酸化膜, 窒化膜付シリコンウエハの 950℃における放射熱物性
日本機械学会論文集, Ser. B, Vol. 55, No. 516, pp. 2404-2410, 1989.

J3 Watanabe, T., Hirasawa, S., Torii, T., Takagaki, T.

Radiation Thermometry of Silicon Wafers in a Diffusion Furnace with Rod Type and Prism Type of Optical Guides
Experimental Heat Transfer, Vol. 3, No. 4, pp. 371-376, 1990.

J4 渡辺智司, 平澤茂樹, 内野敏幸

半導体製造における放射温度計測の放射率自動補正とノイズ低減方法
Thermal Science and Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 1-5, 1993.

第3章は次の論文からなる

学術雑誌

J5 平澤茂樹, 木枝茂和, 渡辺智司, 鳥居卓爾, 高垣哲也, 内野敏幸

縦型半導体拡散装置におけるウエハ温度分布の解析
日本機械学会論文集, Ser. B, Vol. 57, No. 543, pp. 3938-3943, 1991.

国際会議（査読あり）

C1 Hirasawa, S., Watanabe, T., Takagaki, T, Uchino, T.

Temperature Distribution in Semiconductor Wafers Heated in a Hot-Wall-Type Rapid Diffusion Furnace
Proceedings of 4th InterSociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems (I-THERM 4), pp. 253-260, 1994.

第4章は次の論文からなる

学術雑誌

J6 Watanabe, T., Hirasawa, S.

Network Model Analysis of Poly-silicon Film Deposition on Wafers in CVD Reactor

Journal of Chemical Science and Technology, Vol. 3, No. 1 pp. 1-7, 2014.

第5章は次の論文からなる

学術雑誌

J7 Watanabe, T., Hirasawa, S.

Temperature Distribution and Deposition Rate on Semiconductor Wafers in Low-pressure CVD Equipment Processing Two Wafers

IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 26, No. 4, pp. 572-577, 2013.

国際会議（査読あり）

C2 Watanabe, T., Hirasawa, S.

Thermal Study on Chemical Vapor Deposition Equipment Processing Two Silicon Wafers

ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2013-67000, 2013.

謝辞

本研究を行うに当たり、工業技術院計量研究所の小野晃部長にはシリコンの放射物性や放射温度計測技術に関してご指導をいただきました。また、日立製作所半導体事業部の高垣哲也主任技師、内野敏幸主任技師（現在、ルネサスエレクトロニクス(株)）、西内浩世主任技師（現在、ルネサスエレクトロニクス(株)）、国際電気(株)の鈴木増雄主任技師、池田文秀主任技師（現在、(株)国際電気セミコンダクターサービス）には、研究全般にわたっていろいろのご協力をいただきました。日立製作所機械研究所の鳥居主任研究員、木枝主任研究員（現在、日立建機(株)）、畑田主任研究員（現在、東京大学教授）には、多方面からご支援をいただきました。この他、実験データの収集・整理などについても数多くの方々よりご協力を賜りました。

最後に、神戸大学工学部機械工学科の平澤茂樹教授には、研究の進め方や数値解析に関する技術的な指導、論文構成の方針や創案、まとめ方など非常に多岐に渡り、ご指導を賜りました。

ここに謹んで深く謝意を表します。

神戸大学博士論文「半導体酸化拡散・化学気相成長装置の高精度熱処理・成膜応プロセスに関する研究」全 79 頁

提出日 2015 年 1 月 20 日 097T853T 渡辺智司

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページに掲載されます。

©渡辺智司

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。